

Departement für Nutztiere, Klinik für Wiederkäuer, Abteilung für Wiederkäuerchirurgie
der Vetsuisse Fakultät, Universität Zürich

Vorsteher Departement für Nutztiere: Prof. Dr. med. vet. Heiner Bollwein

Leiter Abteilung für Wiederkäuerchirurgie: Prof. Dr. med. vet. Karl Nuss

Arbeit unter wissenschaftlicher Betreuung von
Prof. Dr. med. vet. Karl Nuss

**Klauenbelastung von Kühen
nach unterschiedlicher Klauenpflege an den Schultergliedmassen
sowie nach Anbringen von Kothurnen**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der
Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich

vorgelegt von

Isabelle Lüchinger

Tierärztin
von Oberriet, SG

genehmigt auf Antrag von
Prof. Dr. med. vet. Karl Nuss, Referent
Prof. Dr. med. vet. Michael Hässig, Korreferent

2020

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Zusammenfassung | 8 |
| 2. Summary | 9 |
| 3. Einleitung und Zielsetzung..... | 10 |
| 4. Literaturübersicht | 12 |
| 4.1. Klauenbelastung | 12 |
| 4.1.1. Physikalische Grundlagen der Messsysteme..... | 12 |
| 4.1.2. Erkenntnisse aus den bisherigen Belastungsmessungen bei Rindern | 14 |
| 4.2. Zusammenhang zwischen Klauenbelastung und Klauenerkrankungen | 21 |
| 4.3. Zusammenhang zwischen Klauenbelastung und Klauenpflege | 23 |
| 4.3.1. Funktionelle Klauenpflege | 23 |
| 4.3.2. Grösse der Sohlenflächen..... | 25 |
| 4.3.3. Veränderung der Klauenbelastung durch Klauenpflege | 27 |
| 4.3.4. Entlastung einer Klaue durch Klauenpflege..... | 28 |
| 4.4. Kothurne – ein Therapiebaustein bei Klauenerkrankungen..... | 29 |
| 4.4.1. Bedeutung der Entlastung einer erkrankten Klaue..... | 29 |
| 4.4.2. Sorten von Kothurnen | 29 |
| 4.4.3. Einsatz von Kothurnen | 30 |
| 4.4.4. Nutzen der Kothurne | 31 |
| 4.4.5. Schädigende Auswirkungen von Kothurnen..... | 33 |
| 4.5. Fragestellungen der hier vorgelegten Arbeit..... | 34 |
| 5. Tiere, Material und Methoden..... | 35 |
| 5.1. Kühe und deren Vorbereitung auf die Messungen..... | 35 |
| 5.2. Messsystem | 42 |
| 5.2.1. Messstand..... | 42 |
| 5.2.2. Kraft- und Druckmessplatten sowie Mess-Software..... | 44 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.2.3. | Messparameter | 47 |
| 5.3. | Versuchsablauf..... | 49 |
| 5.4. | Bearbeitung der Rohdaten..... | 54 |
| 5.5. | Statistische Datenanalyse und Berechnung weiterer Parameter | 58 |
| 5.5.1. | Statistische Methoden | 59 |
| 5.5.2. | Weitere Berechnungen | 60 |
| 6. | Resultate | 62 |
| 6.1. | Ausgangssituation: Klauen nach funktioneller Klauenpflege..... | 62 |
| 6.1.1. | Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen | 62 |
| 6.1.2. | Messwerte für die Vordergliedmassen | 62 |
| 6.1.3. | Messwerte für die Hintergliedmassen | 71 |
| 6.1.4. | Klauenmasse (Dorsalwandlänge und Dorsalwandwinkel) an den Klauen der Vorder- und Hintergliedmassen | 80 |
| 6.2. | Messsituation «Holzplättchen an den Aussenklauen beider Vordergliedmassen» | 83 |
| 6.2.1. | Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen | 83 |
| 6.2.2. | Messwerte für die Vordergliedmassen | 83 |
| 6.3. | Messsituation «Holzplättchen an den Innenklauen beider Vordergliedmassen»..... | 99 |
| 6.3.1. | Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen | 99 |
| 6.3.2. | Messewerte für die Vordergliedmassen | 99 |
| 6.4. | Messsituation «Kothurn an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse»..... | 115 |
| 6.4.1. | Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen | 115 |
| 6.4.2. | Messwerte für die Vordergliedmassen | 115 |
| 6.4.3. | Messwerte für die Hintergliedmassen | 133 |
| 6.5. | Messsituation «Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse» | 138 |
| 6.5.1. | Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen | 138 |
| 6.5.2. | Messwerte für die Hintergliedmassen | 138 |
| 6.5.3. | Messwerte für die Vordergliedmassen | 157 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 7. Diskussion | 162 |
| 8. Literaturverzeichnis..... | 186 |
| 9. Anhang | 200 |
| 10. Danksagungen | 207 |
| 11. Lebenslauf | 209 |

1. Zusammenfassung

Die hier vorgelegte Arbeit hatte zwei Ziele. Zum einen sollte ermittelt werden, wie die Innenklauen der Vorderbeine durch Klauenpflege entlastet werden können; zum anderen sollten die Einflüsse eines an eine Klaue angebrachten Kothurns auf die Belastung der übrigen Klauen und Gliedmassen quantifiziert werden. Hierzu wurden bei 28 Milchkühen mithilfe einer Kraft- und einer Druckmessplatte die auf die Klauen einwirkenden Lasten ermittelt. Die Klauenpflegemassnahmen an den Vorderbeinen wurden durch Ankleben von 3 mm hohen Holzplättchen entweder an beide Aussen- oder beide Innenklauen simuliert. Zur Überprüfung der Auswirkung von Entlastungsmassnahmen wurde ein Kothurn einmal an der Aussenklaue des linken Vorderbeins und ein andermal an der Innenklaue des linken Hinterbeins angebracht. Die Innenklauen der Vorderbeine wurden nur dann entlastet, wenn die Holzplättchen an den Aussenklauen befestigt waren. Die Klaue mit dem Kothurn trug nahezu die gesamte Gliedmassenlast, während die Partnerklaue praktisch vollständig entlastet wurde. Geringe Teile der Last wurden auf die kontralaterale Gliedmasse und auf Vorder- oder Hintergliedmassen übertragen. Dabei wurden die Aussenklauen des kontralateralen Hinter- und des ipsilateralen Vorderbeins signifikant mehrbelastet.

2. Summary

The present study aimed to address two main objectives: First, to determine how functional claw trimming can contribute to reducing the load on the medial claws of the forelimbs; second, to assess the effects of a claw block on the weight distribution of the other claws and limbs. Vertical ground reaction forces and pressures acting on the claws of a total of 28 dairy cows were measured using a force plate and a pressure plate. Different claw trimming methods were simulated by attaching wooden platelets with a thickness of 3 mm either to the lateral or to the medial claws of both forelimbs. For the second objective, a wooden block was attached to the lateral claw of the left forelimb and subsequently to the medial claw of the left hind limb. A significant reduction of the load on the medial claws of the forelimbs was only achieved with the wooden platelets attached to the lateral claws. The claw with the block carried nearly all the load of the respective limb, whereas the adjacent claw was almost completely excluded from weight bearing. Small amounts of load were transferred to the contralateral leg and towards the fore- or hind limbs. In these instances, the lateral claws of the contralateral hind limb and of the ipsilateral forelimb carried significantly more weight than without any block.

3. Einleitung und Zielsetzung

Erkrankungen des Bewegungsapparates bei Milchkühen haben unter den Bedingungen einer industriellen und finanzmarkt-dominierten Haltung weltweit stark zugenommen. Schmerzhaftes Klauenerkrankungen führen zu unakzeptabel hohen Lahmheitsprävalenzen (Russell et al., 1982; Peterse, 1985; Clarkson et al., 1996; Cook, 2003; Dippel et al., 2009; Barker et al., 2010; Kofler et al., 2013; Becker et al., 2014; Solano et al., 2015; Newcomer und Chamorro, 2016; Sadiq et al., 2017). Eine Klauenerkrankung beeinträchtigt das Wohlergehen der Tiere sehr stark (Greenough et al., 1997; O’Callaghan, 2002; Whay et al., 2003; Bruijnis et al., 2012; Shearer et al., 2013) und führt zu ökonomischen Einbussen für die Tierhalter (Carvalho et al., 2005, 2006, Ettema und Østergaard, 2006; Neveux et al., 2006; Bruijnis et al., 2010; Huxley, 2013).

Ein wesentlicher Bestandteil einer Strategie zur Bekämpfung von Klauenerkrankungen ist die Klauenpflege (Shearer und van Amstel, 2001; Hernandez et al., 2007). Nach Toussaint Raven (1985, 1998) wird sie an den Hinterbeinen in fünf Schritten durchgeführt, wobei besonderer Wert auf die gleichmässige Verteilung der Gliedmassenlast auf die Klauen und die Klauenzonen gelegt wird (Kümper, 1997; Blowey, 1998a; Shearer und van Amstel, 2001; Fiedler, 2004; Fiedler et al., 2004; Lischer et al., 2014). Die Klauenpflege an den Vorderbeinen soll prinzipiell gleich wie an den Hinterbeinen durchgeführt werden, jedoch fehlen in der Literatur bisher detaillierte Angaben darüber. Bei Rindern sind an den Vordergliedmassen die Innenklauen mehrbelastet (Mair et al., 1988; Spielmann, 1990; Hubert, 1993; Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2004; Cardona Gavaldon, 2018). Ein alleiniges Angleichen des Sohlenniveaus von Innen- und Aussenklauen führte nicht zu einer ausgeglichenen Belastungssituation (Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2004; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018).

Die erste Frage der hier vorgelegten Untersuchung lautete daher, durch welche klauenpflegerische Massnahme die Innenklauen der Vorderbeine entlastet werden können. Die zweite Fragestellung befasste sich mit der Entlastung von erkrankten Klauen mit einem 3 cm hohen Holzkothurn. Untersucht werden sollte, wie er sich auf die Belastung der Klaue, auf der er angebracht ist, und auf die Entlastung ihrer Partnerklaue auswirkt. Weiterhin interessierte, ob es zu einer Gewichtsverlagerung auf die – und innerhalb der – Partnergliedmasse kommt und

inwieweit als Folge eines Kothurns die Last auf die Vorder- oder Hinterbeine verschoben wird.

4. Literaturübersicht

4.1. Klauenbelastung

In den letzten Jahrzehnten stand die Klauenbelastung zunehmend im Zentrum des Interesses der Forschung über die Lahmheitsursachen beim Rind, weil ein Zusammenhang zwischen den von Erkrankungen häufig betroffenen Klauen und einer stärkeren Belastung respektive dort auftretenden Belastungsspitzen vermutet wurde (Toussaint Raven, 1971, 1973; Ossent et al., 1987; Mair et al., 1988; Distl et al., 1990; Spielmann, 1990; Hubert, 1993; van der Tol et al., 2002, 2003, 2004; Gerwing, 2003; Zeiner et al., 2007; Telezhenko et al., 2008; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018; Müller, 2018; Oehme et al., 2018). Die Untersuchungen gingen dabei vor allem der Frage nach, wie sich das Gewicht der Kuh auf die Gliedmassen und die einzelnen Klauen verteilt.

4.1.1. Physikalische Grundlagen der Messsysteme

Die Belastung einer Gliedmasse kann durch zwei Grössen erklärt werden: Kraft und Druck. Der vertikalen Gewichtskraft einer Gliedmasse wirkt der Untergrund mit der sogenannten Bodenreaktionskraft entgegen. Diese kann mithilfe von Wiegeeinrichtungen (via Berechnungen: Kraft in Newton entspricht dem Körpergewicht multipliziert mit 9.81, dem Wert für die Erdbeschleunigung) oder Kraftmessplatten (via Dehnungsmessstreifen oder Piezokristallen, die dreidimensionale Kraftvektoren registrieren) gemessen werden. Mittels Wiegeeinrichtungen (wie beispielsweise eine 4-Waagen-Plattform) wurde schon zu Zeiten vor der Entwicklung von Kraftmessplatten die Verteilung des Körpergewichts bei Kühen auf Vorder- und Hintergliedmassen oder Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Gliedmasse bestimmt (Feszl, 1968, Toussaint Raven, 1971, 1973). Ossent et al. (1987) ermittelten mit einer zweigeteilten doppelten Kraftmessplatte die Lastverteilung auf Aussen- und Innenklauen der Hintergliedmassen. Mittels solcher Gewichts- oder Kräftermessungen lassen sich jedoch keine Aussagen zur Verteilung der Bodenreaktionskraft über die Klauensohle treffen. Einzig der mittlere Druck innerhalb einer solchen Fläche (als Kraft pro Fläche; angegeben in Newton pro Quadratzentimeter) kann indirekt bestimmt werden, indem er aus den Grössen Gewichtskraft und Fussungsfläche berechnet wird.

Erst die Verwendung einer Druckmessplatte erlaubt eine Flächenauflösung und damit eine sogenannte direkte Messung des Druckes an unterschiedlichen Stellen unter den Klauensohlen (Spielmann, 1990; Gerwing, 2003). Druckmessplatten enthalten Drucksensoren, die nach vielen verschiedenen physikalischen Prinzipien funktionieren können und deren Anzahl pro Quadratzentimeter die Flächenauflösung bestimmt. Webb und Clark (1981) sowie Scott (1988) verwendeten für Messungen an Kühen eine Kraftmessplatte (Firma Kistler, Winterthur, Schweiz) zusammen mit einem Pedobarographen in Form einer gläsernen Druckmessplatte, wobei es sich also um eine – wie von Mair (1989) formuliert – kombinierte elektro-optische Methode zur Messung der Druckverteilung handelte. Zu den mechanisch-elektrischen Methoden der Druckverteilungsmessung zählen beispielsweise das kapazitive sowie das resistive Messsystem. Eine flexible Matte zur Druckmessung nach dem kapazitiven Prinzip wurde für die Humanmedizin erstmals im Jahr 1976 von Nicol und Hennig vorgestellt. Die damalige Grösse eines Messfühlers von 3 cm² konnte von Brunner et al. (1983) auf 0.25 cm² verringert werden. Eingang in die Veterinärmedizin fanden kapazitive Drucksensoren dank Mair et al. (1988). Diese Forscher entwickelten eine Messplattform, auf deren Messfläche dieselbe Flächenauflösung wie bei Brunner et al. (1983) erreicht werden konnte, welche aber dem hohen Körpergewicht der Rinder standhalten und den Tieren gleichzeitig einen natürlichen Stand während der Messungen erlaubte. Zur Auswertung der Druckverteilungsbilder wendeten sie ein computerisiertes Bildanalyseverfahren an. Die Messdauer von 33 Sekunden, während der je 1 Druckbild pro Sekunde generiert wurde, war allerdings noch sehr lang. Während dieser Zeit waren Gewichtsverlagerungen der Tiere möglich (Mair, 1989).

Etliche Autoren unternahmen in der Folge ebenfalls Untersuchungen mit Druckmessplatten bei Rindern, unter anderen Spielmann (1990), Hubert (1993), van der Tol et al. (2002, 2003, 2004), Gerwing (2003), Alsleben et al. (2003), Huth et al. (2004, 2005), Carvalho et al. (2002, 2005, 2006), Zeiner et al. (2007), Bruderer (2015), Cardona Gavaldon (2018), Müller (2018) und Zimmermann (2018). Mit einer Druckmessplatte nach dem resistiven Prinzip (Footscan[®]-Platte der Firma RSscan International, Olen, Belgien) und einer Auflösung von 2.6 Drucksensoren pro Quadratzentimeter (das heisst, ein Sensor besass eine Fläche von 0.39 cm²) arbeiteten van der Tol et al. (2002, 2003, 2004). Diese Autoren kombinierten die Druckmessplatte mit einer Kraftmessplatte der Firma Kistler. Die Messgeschwindigkeit hatte sich im Vergleich zu Mair et al. (1988) stark erhöht: Es konnten 313 Einzelbilder pro Sekunde registriert werden. Auf eine Kombination einer resistiven Druckmessplatte (MatScan[®]-Platte der Firma Tekscan[®] Inc., Boston, Massachusetts, USA; mit 1.4 resistiven Sensoren pro Quad-

ratzentimeter) mit einer Kraftmessplatte setzten auch Carvalho et al. (2002, 2005, 2006) für ihre Messungen. Gerwing (2003), Alsleben et al. (2003) sowie Huth et al. (2004, 2005) benutzten eine kapazitive Druckmessplattform (Pedographie-Analyser Emed SF, Firma Zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland), welche 4 Messfühler pro Quadratzentimeter beinhaltete, und dazu eine Weiterentwicklung der von Mair et al. (1988) entwickelten Auswertungssoftware. Sie konnten 50 Bilder pro Sekunde aufzeichnen. Zeiner et al. (2007) zogen für ihre in-vitro-Druckverteilungsmessungen eine kapazitive Druckmessplatte der Firma Zebris Medical GmbH bei, welche 1 kapazitiven Drucksensor pro Quadratzentimeter enthielt. Bruderer (2015), Cardona Gavaldon (2018) sowie Müller (2018) arbeiteten wie van der Tol et al. (2002, 2003, 2004) mit einer Druckmessplatte der Firma RSscan International mit einer Flächenauflösung von 2.6 Sensoren pro Quadratzentimeter, kombinierten diese aber mit einer speziell dazu angefertigten Kraftmessplatte der Firma AMTI (Watertown, Massachusetts, USA). Neueste Messungen von Oehme et al. (2018) sowie Mülling und Pesenhofer (2018) wurden nicht auf Druckmessplatten, sondern mittels direkt auf die Klauensohlen angebrachten, resistiven Drucksensorfolien (HoofTM-System der Firma Tekscan[®] Inc., Boston, Massachusetts, USA) mit 3.9 Sensoren pro Quadratzentimeter durchgeführt.

4.1.2. Erkenntnisse aus den bisherigen Belastungsmessungen bei Rindern

Verteilung des Körpergewichts auf die Vorder- und Hintergliedmassen

Das Körpergewicht des Rindes wird mehrheitlich von den Vordergliedmassen getragen. Feszl (1968) errechnete bei adulten Kühen eine Gewichtsverteilung von 54.7 % auf die Vordergliedmassen und 45.3 % auf die Hintergliedmassen, Scott (1988) kam auf entsprechende Werte von 55.0 % bis 57.0 % und 46.0 % bis 47.0 %. Nach van der Tol et al. (2004) trug eine Vordergliedmasse einer Milchkuh im Durchschnitt 31.1 %, eine Hintergliedmasse 24.3 % der Gesamtlast. Die Werte von Scott (1988) und van der Tol et al. (2004) waren nicht auf 100 % addierbar, weil sie nicht aus simultanen, sondern aus aufeinanderfolgenden Messungen hervorgingen. Nach den neueren Untersuchungen von Bruderer (2015) und Cardona Gavaldon (2018) waren die Vordergliedmassen mit 54.1 % respektive 53.7 % und die Hintergliedmassen mit 45.9 % respektive 46.3 % des Körpergewichts einer Kuh belastet.

Verteilung des Körpergewichts auf die Aussen- und Innenklauen

Die Hintergliedmassen standen wegen der höheren Erkrankungsprävalenz (Russel et al., 1982; Murray et al., 1996; Newcomer und Chamorro, 2016; Solano et al., 2016) stets stärker im Interesse der Forschung als die Vordergliedmassen. So nahm Toussaint Raven (1971, 1973) mit einer Doppelwaage Belastungsmessungen an den Hintergliedmassen vor und konnte dabei die auf den medialen und lateralen Klauen einer Hintergliedmasse lastenden Gewichte gleichzeitig messen. Er mass eine starke Mehrbelastung der Aussenklaue (60.0 % bis 70.0 % der Gliedmassenlast) im Vergleich zur Innenklaue (30.0 % bis 40.0 % der Gliedmassenlast). Die stärkere Belastung der Aussenklauen der Hintergliedmassen wurde später bei ausgewachsenen Kühen mit ungepflegten Klauen durch die Untersuchungen von weiteren Autoren bestätigt, wobei van der Tol et al. (2004) das am stärksten divergierende Belastungsverhältnis zwischen Aussen- und Innenklaue (80.0 % zu 20.0 %) feststellten. Nach Zeiner et al. (2007) betrug die Lastverteilung 75.0 % zu 25.0 %. Anderen Untersuchungen zufolge war der Unterschied etwas geringer, aber immer noch sehr deutlich: Die Belastungsverhältnisse zwischen Aussen- und Innenklaue betrugen 68.0 % zu 32.0 % (Müller, 2018), 67.8 % zu 32.2 % (Gerwing, 2003) respektive 67.0 % zu 33.0 % (Cardona Gavaldon, 2018).

An den Vordergliedmassen war die mediale Klaue mit 53.1 % der Gliedmassenlast leichtgradig stärker belastet als die laterale mit 46.9 % (Mair et al., 1988). In der Folge wurde die Mehrbelastung der Innenklauen der Vordergliedmassen durch weitere Autoren bestätigt (Spielmann, 1990; Hubert, 1993; Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2004; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018). Diese Autoren fanden allerdings stärkere Belastungsunterschiede zwischen Aussen- zu Innenklaue, nämlich von 24.5 % bis 35.4 % zu 64.6 % bis 75.5 %, vor.

Mittlere und maximale Drücke an den Klauen

Diejenigen Klauen, welche bei ausgewachsenen Kühen den grössten Anteil der Gliedmassenlast trugen, waren nach vielen Autoren auch diejenigen, an welchen die höchsten Werte für mittleren und maximalen Druck zu finden waren. Die höchsten Druckwerte waren somit an der Innenklaue der Vordergliedmassen (Hubert, 1993; van der Tol et al., 2002; Bruderer, 2015) und an den Aussenklauen der Hintergliedmassen (Gerwing, 2003; van der Tol et al., 2002; Bruderer, 2015; Müller, 2018) festzustellen. Distl et al. (1990), die nur die Vorder-

gliedmassen untersuchten, stellten dort zwar bei erstlaktierenden Kühen eine höhere Druckbelastung der Innenklauen fest, nicht jedoch bei zweitlaktierenden. Bei den letzteren waren die Aussenklauen höheren Drücken ausgesetzt.

Van der Tol et al. (2002) lokalisierten an den Vordergliedmassen die höchsten maximalen Drücke auf Klauenebene in den Ballenregionen von Aussen- und Innenklaue, an den Hintergliedmassen in der Ballenregion der Aussenklaue und in der Sohlenspitzenregion der Innenklaue. Auf eine Gliedmasse bezogen wurde an den Vordergliedmassen der grösste mittlere und maximale Druck häufig in der Ballenregion der Innenklaue registriert (Mair et al., 1988; Distl et al., 1990; Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2002; Bruderer, 2015), an den Hintergliedmassen in der Ballenregion der Aussenklaue (van der Tol et al., 2002; Gerwing, 2003; Kehler und Gerwing, 2004; Zeiner et al., 2007; Zeiner, 2008; Bruderer, 2015; Müller, 2018). Andererseits wurden an den Vordergliedmassen höchste mittlere Drücke auch in der Ballenregion der Aussenklaue festgestellt (Carvalho et al., 2005, 2006).

Einflüsse auf die Gewichtsverteilung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen

Nach Feszl (1968) hing die Lage des Körperschwerpunktes sowohl vom Füllungszustand des Pansens, vom Trächtigkeitsstadium als auch vom Eutergewicht (respektive der Milchleistung) ab. Er stellte fest, dass es mit zunehmendem Trächtigkeitsstadium zu einer Verschiebung des Körperschwerpunktes nach kaudal kam. Die Belastung der Hintergliedmassen nahm bei hochgraviden Kühen im Vergleich zu niedertragenden Kühen durchschnittlich um 2.0 Prozentpunkte zu. Das Gewicht des Fetus schien also mehr auf die Hintergliedmassen verlagert zu werden. Scott (1988) stellte keine Änderung der Gewichtsverteilung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen im Laufe einer Trächtigkeit fest. Chapinal et al. (2009) bestätigten dies und errechneten, dass die Vordergliedmassen vor und nach Kalbung 52.0 % und die Hintergliedmassen 48.0 % des Körpergewichts trugen. Das Ausmass der Euterfüllung mit Milch hatte hingegen einen grösseren Einfluss auf die Gewichtsverteilung zwischen den Gliedmassenpaaren: Nach dem Melken nahm die Last auf den Hintergliedmassen nämlich stärker ab als diejenige auf den Vordergliedmassen, sodass sich die Gewichtsverteilung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen von 51.0 % zu 49.0 % vor dem Melken auf 53.0 % zu 47.0 % nach dem Melken änderte (Chapinal et al., 2009).

Neveux et al. (2006) führten Untersuchungen zur Gewichtsverschiebung als Reaktion auf eine unbequeme Standfläche durch: Beim Stehen einer Vordergliedmasse auf einer unbequemen Standfläche kam es zu einer Gewichtsübertragung auf die ipsilaterale Hintergliedmasse, umgekehrt jedoch nicht. Wenn beide Vordergliedmassen sich auf der unbequemen Oberfläche befanden, nahm deren Belastung um durchschnittlich 1.2 Prozentpunkte ab, die der Hintergliedmassen folglich um 1.2 Prozentpunkte zu. Die Autoren schlussfolgerten, dass Kühe unter bestimmten Umständen ein wenig Gewicht von den Vorder- zu den Hinterbeinen verlagern konnten, aber nicht umgekehrt. Unterstützung dafür sahen sie in der Tatsache, dass die Last der Milch im Euter nach den Versuchen von Chapinal et al. (2009) – wie zuvor beschrieben – beinahe ausschliesslich (zu 89.0 %) von den Hintergliedmassen getragen wurde. Im Gegensatz dazu sprachen die Ergebnisse einer Untersuchung von Singh und Mohanty (2012) dafür, dass Kühe das Körpergewicht in beide Richtungen verschieben konnten. Dies stellten sie in Versuchen mit lahmen Kühen fest, wobei sie bei einer Lahmheit an einer Hintergliedmasse eine Gewichtsverschiebung in Richtung der Vordergliedmassen, und umgekehrt, registrierten.

In Anbindeställen wurde häufig beobachtet, dass Kühe mit den Hintergliedmassen im Kotgraben und somit mit den Vordergliedmassen verhältnismässig erhöht standen. Chapinal et al. (2009) untersuchten deswegen die Hypothese, ob solche Kühe für das Auftreten von Lahmheiten an den Hinterbeinen prädisponiert sind. Ihren Messungen zufolge kam es allerdings zu keiner Gewichtsverschiebung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen bei erhöhtem Stand der Vordergliedmassen. Die Autoren vertraten darum die Meinung, dass die Kühe an den Hintergliedmassen ihre Gliedmassenwinkelung änderten, um einer solchen Gewichtsverschiebung von vorne nach hinten entgegenzuwirken. Sie schlussfolgerten, dass das in früheren Untersuchungen beschriebene gehäufte Auftreten von Lahmheiten bei vorne erhöht stehenden Kühen (Colam-Ainsworth et al., 1989; Galindo und Broom, 2000; Rusterholz, 1920) wohl darin begründet war, dass die Hintergliedmassen vermehrt in einer feuchten, für Horn und Haut schädlichen Umgebung standen und es somit gehäuft zu Entzündungen im Bereich des Ballens und des Zwischenklauenspaltes kam. Lahmheiten traten laut Chapinal et al. (2009) an den Hintergliedmassen also nicht etwa vermehrt auf, weil mehr Gewicht auf den Klauen der Hinterbeine ruhte. Cardona Gavaldon (2018) konnte bestätigen, dass es nicht zu einer Verschiebung des Körpergewichts auf die Hinterbeine kam. Die Autorin konnte sogar feststellen, dass der vorne erhöhte Stand zu einer geringen, statistisch aber signifikanten Gewichtsverlagerung auf die Vordergliedmassen (Zunahme des Körpergewichtsanteils der Vordergliedmassen von 53.7 % auf 54.4 %) führte, wobei sie der Neigung des Kopfes eine Rolle

zuschrieb. Sie diskutierte die Möglichkeit, dass Kühe auf diese Weise die Klauen der Hintergliedmassen entlasten könnten.

Auswirkungen von Haltungssystem und Bodenbeschaffenheit auf die Klauenbelastung

Sowohl Haltungssystem als auch Bodenbeschaffenheit haben Auswirkungen auf die Klauenbelastung und sind bekannte und wichtige Risikofaktoren bei der Entstehung von Klauenerkrankungen (Telezhenko und Bergsten, 2005, Telezhenko et al. 2007, 2008, 2009). Für Rinder natürlich ist die ganzjährige Haltung auf weichem Boden (offene Waldlandschaften und Wiesen), wo sich Klauenhornwachstum und -abrieb die Balance halten (Tranter und Morris, 1992; Nuss et al., 2014). Kühe zeigten auf einer Wiese einen freien, entspannten Gang (Schilliger, D., Nuss, K., 2012: Lehrfilm über die funktionelle Klauenpflege beim Rind. In: <https://tube.switch.ch/cast/videos/5fc5d4ac-b981-4092-938f-31b8ce334025>; letzter Zugriff: 09.01.2020), weil beim Auffussen mit dem Ballen der Aussenklauen auf Gras weniger starke Kräfte wirkten als auf hartem Boden und die Innenklauen dabei schon von Beginn der Standphase weg einen grossen Anteil der Last trugen (Seebacher et al., 1980; Schmid et al., 2009). Alsaad et al. (2017) stellten längere Fussungsphasen, grössere Schritte und einen schnelleren Gang beim Gehen auf der Weide im Vergleich zu Gummi- oder Betonböden fest, was sie mit einem grösseren Wohlbefinden der Tiere verbanden. Innerhalb der Stallhaltung gibt es wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf die Belastung der Klauen: So waren in der Untersuchung von Hubert (1993) die mittleren und maximalen Drücke unter den Klauensohlen bei Laufstallklauen aufgrund grösserer Fussungsflächen in Folge des dort stärker stattfindenden Abriebes signifikant niedriger als bei Anbindestallklauen. Anbindehaltung führte zu starkem Längenwachstum der Dorsalwand und einer Verschiebung des Schwerpunktes nach kaudal in den Ballenbereich, weshalb bei solchen Klauen die grösseren Drücke gefunden wurden als bei Klauen aus Laufstallhaltung. Umgekehrt verhielt es sich jedoch bei den Drücken im Sohlenspitzenbereich. Bei Laufstallhaltung gibt es je nach Untergrund wiederum Unterschiede bezüglich des Wohlbefindens und der Drücke an den Klauensohlen: Vom Aspekt des Kuhkomforts her betrachtet konnten Ouweltjes et al. (2009) nachweisen, dass sich Kühe auf Böden mit Gummimatten wohler fühlen als auf solchen aus Beton. Bei Gummimattenbelag verbrachten sie mehr Zeit stehend in den Laufgängen und waren aktiver. Schon zuvor konnten Bergsten (2004), Telezhenko und Bergsten (2005) sowie Telezhenko et al. (2007) eine Präferenz für einen weichen, mit Gummimatten ausgelegten Untergrund im Vergleich mit einem harten

Betonuntergrund feststellen. Telezhenko et al. (2008) verglichen die Gewichts- und Druckverteilung bei einer Haltung auf stark abrasivem Asphaltboden, auf wenig abrasivem Betonboden sowie auf Gummimatten. Sie stellten wie Hubert (1993) fest, dass die Haltung auf einer stark abrasiven Oberfläche in Klauen mit grösserer Fussungsfläche resultierte, wodurch sich der mittlere Druck verringerte. Allerdings wurde bei Asphaltbodenbelag das meiste Gewicht infolge des fehlenden Wandhorns (Tragrands) von der Sohlenregion getragen. Zudem konnten die Autoren einen deutlichen Verlust der Konkavität der Sohlenfläche nach Stallhaltung auf abrasivem Asphaltboden feststellen (Telezhenko et al., 2009) – im Gegensatz zu Weideklauen, welche natürlicherweise eine ausgehöhlte Sohlenfläche aufweisen (Tranter und Morris, 1992; Nuss et al., 2014) – und brachten dies mit einem erhöhten Risiko für die Schädigung der Sohlenlederhaut in Verbindung (Telezhenko et al., 2008). Schon Tranter et al. (1993) betonten die Rolle der Sohlenkonkavität und sahen einen Zusammenhang zwischen deren Fehlen und dem Auftreten von Lahmheit. Aussenklauen von Hinterbeinen, welche eine lahmsverursachende Läsion aufwiesen, hatten ihren Befunden nach eine signifikant weniger ausgehöhlte Sohle als die Partnerklauen oder die Aussenklauen von Kontrolltieren. Die Haltung auf weicheren Gummiböden, aber auch auf wenig abrasiven Betonböden, verursachte laut Telezhenko et al. (2008) aufgrund des ungestörten Klauenwachstums eine Gewichtsverschiebung in Richtung Ballen und, aufgrund einer kleineren Bodenkontaktfläche, einen grösseren Durchschnittsdruck als bei abrasivem Asphaltboden. Das Gewicht wurde – im Gegensatz zum stark abrasiven Untergrund – mehrheitlich vom Ballen und von der Klauenwand getragen und weniger von der Klauensohle. Hinterhofer et al. (2005a) untersuchten die Belastung der Klauen auf unterschiedlichen Oberflächen (weicher und harter Boden) mithilfe von Computermodellen: Insgesamt traten auch nach diesen Autoren auf hartem Boden die höheren Drücke auf (Druckspitzen im Ballenbereich). Hinterhofer et al. (2005a) zogen die Schlussfolgerung, dass sich kleine Unebenheiten in der Sohlenfläche gerade auf hartem Boden besonders stark auswirkten und rasch zu Sohlenblutungen führten. Bruderer (2015) untersuchte Belastung und Druckverteilung beim Stand auf zwei unterschiedlichen Gummimatten, einer härteren Variante und einer weicheren, die jedoch Noppen an der Unterseite aufwies. Bei der weicheren Gummimatte waren die Klauenabdrücke grösser und die mittleren gemessenen Drücke folglich kleiner. Die Maximaldrücke waren auch auf Gummimatten weiterhin in den Ballenregionen lokalisiert. Die auf der härteren Gummimatte gemessenen mittleren Drücke unterschieden sich nicht signifikant von den auf hartem Boden gemessenen; allerdings waren die Maximaldrücke auf der härteren Gummimatte geringer. Die Last schien sich

also bei der härteren Gummimatte gleichmässiger auf die Klauensohle zu verteilen als ohne Gummimatte. Bei der weicheren Gummimatte mit Noppen kam aber es zu viel stärkeren Maximaldrücken als ohne Gummimatte, weil sich die Noppenstruktur bis auf die Klauen durchdrückte und so zu lokalen Druckmaxima führte. Erstmals beim Rind wurden von Oehme et al. (2018) Druckmessungen mithilfe von Drucksensor-Folien, welche direkt auf die Klauensohlen aufgebracht werden konnten, an den Hintergliedmassen zum Vergleich von Betonboden und Gummimatten durchgeführt. Diese Autoren stellten ähnlich wie Telezhenko et al. (2008) sowie Bruderer (2015) fest, dass auf der Gummimatte die Kontaktfläche der Klauen mit dem Untergrund grösser und der mittlere sowie maximale Druck dafür kleiner waren als auf dem Betonboden. Sie schlussfolgerten, dass Betonboden die Klauen deutlich mehr mechanisch beanspruchte als eine Gummimatte.

Klauenbelastungsmessungen und Lahmheitserkennung

Mit steigenden Tierzahlen in Betrieben sowie aufgrund der somit knapper werdenden Zeit, die den Landwirten zur Beobachtung des einzelnen Tiers zur Verfügung steht, wird es stetig schwieriger, den Gang von Einzeltieren mit einem Scoring-System zu beurteilen (Manson und Leaver, 1988; Sprecher et al., 1997; Neveux et al., 2006; Pastell et al., 2008, 2010). Mehrere Autoren setzten sich deshalb zum Ziel, zu untersuchen, ob lahme Kühe mithilfe von Kraft- und Druckmessungen erkannt werden können und ob sich daraus ein automatisches Entdeckungssystem entwickeln lässt. Die Arbeitsgrundlage dazu war, dass eine Gliedmasse mit einer schmerzhaften Klauenläsion zur Schmerzreduktion entlastet und die gesunde, kontralaterale Gliedmasse folglich vermehrt belastet wird (Neveux et al., 2006; Pastell et al., 2006; Dyer et al., 2007; Chapinal et al., 2010). So stellte schon Scott (1989) fest, dass die Klauen einer lahmen Gliedmasse weniger stark belastet wurden als die der kontralateralen. Mithilfe von Wägezellen und Kraftmessplatten wurde diese Gewichtsverlagerung bestätigt (Pastell et al., 2006, 2010; Rushen et al., 2007; Kujala et al., 2008; Chapinal et al., 2010; Nechanitzky et al., 2016). Pastell et al. (2008, 2010) sahen eine vielversprechende Einsatzmöglichkeit solcher Messplattformen in Haltungssystemen mit Melkroboter. Mithilfe ihrer experimentell geschaffenen, für Kühe „unkomfortablen“ Standflächen konnten Neveux et al. (2006) feststellen, dass diese zu einer grösseren Asymmetrie der Gewichtsverteilung zwischen zwei Extremitätenpaaren führten. So zeigten dann auch Rinder ohne Klauenläsionen eine bessere Symmetrie der vertikalen Kräfte zwischen den beiden Hintergliedmassen als Rinder mit Klauenläsionen

(Almeida et al., 2007). Bei Letzteren kam es zu einer höheren Gewichtsbelastung der gesunden Gliedmasse als der kranken. Eine lahme Gliedmasse konnte aber mittels solchen Wiegeeinrichtungen nicht nur aufgrund ihrer reduzierten Gewichtsbelastung entdeckt werden, sondern auch anhand einer Zunahme des Trippelns. Das Trippeln stellt eine starke Form der Gewichtsentslastung dar, da zwischenzeitlich die kranke Gliedmasse komplett aus der Belastung genommen wird, und steht auch für das erhöhte Unwohlsein einer lahmen Kuh (Chapinal und Tucker, 2012). Allerdings muss die Messung der Anzahl Trippelvorgänge im Stehen mit Vorsicht betrachtet werden, wenn sie während des Melkprozesses durchgeführt wird. Denn dann lässt sich das häufige Hin-und-her-Treten der Kühe nach Rousing et al. (2004) eher auf die Einflussfaktoren Eutergesundheit, Melktechnik und Gewohnheit der Tiere ans Handling zurückführen als auf eine Lahmheit.

4.2. Zusammenhang zwischen Klauenbelastung und Klauenerkrankungen

Zwischen den am stärksten belasteten Klauen und Klauenregionen einerseits und der Lokalisation der häufigsten Erkrankungen andererseits wurden deutliche Zusammenhänge hergestellt (Toussaint Raven, 1971, 1973; Ossent et al., 1987; Mair, 1989; van der Tol et al., 2002). An den Hintergliedmassen erkrankten die Aussenklauen signifikant häufiger als die Innenklauen (Russel et al., 1982; Clarkson et al., 1996; Murray et al., 1996; Dyer et al., 2007, Newcomer und Chamorro, 2016). Bei der Entstehung von Sohlengeschwüren soll die übermässige Druckbelastung der Lederhaut eine entscheidende Rolle spielen. So konzentrieren sich Kräfte und Drücke im Stand und auch beim Gehen gerade in den von Geschwüren betroffenen Ballenregionen der Aussenklauen der Hinterbeine (Smits et al., 1992; Kloosterman, 1997; Toussaint Raven, 1998; Gerwing, 2003; Meyer et al., 2007; Zeiner et al., 2007). An den Vordergliedmassen sind laut vielen, nicht jedoch laut allen Studien die Innenklauen signifikant häufiger als die Aussenklauen von Klauenhornläsionen betroffen (Andersson und Lundström, 1981; Murray et al., 1996; Solano et al., 2016; Correa-Valencia et al., 2018). Bei im Westen Kanadas im Sommer auf der Weide gehaltenen Rindern und Kühen von Fleischrassen wurden allerdings mit 58.3 % zu 41.7 % häufiger Lahmheitsursachen an den Aussenklauen der Vordergliedmassen gefunden (Newcomer und Chamorro, 2016) als an den im Stehen mehrbelasteten Innenklauen. Für 52.6 % der Lahmheiten an den Vordergliedmassen waren Hornspalten verantwortlich, und diese waren wiederum fast doppelt so häufig an den Aussen- wie an den Innenklauen lokalisiert. Schon in mehreren anderen Studien waren Hornspalten

bei kanadischen Weiderindern deutlich häufiger (zwischen 63.0 % und 85.0 %) an den lateralen als an den medialen Klauen der Vordergliedmassen zu finden gewesen (Hand et al., 1992; Goonewardene und Hand, 1995; Campbell et al., 2000; Clark et al., 2004; Goonewardene et al., 2004). Schmid et al. (2009) sahen die Ursache dafür in den Kräften, die beim Auffussen stärker auf die lateralen Klauen als auf die Innenklauen der Vordergliedmassen einwirkten.

Generell sind die Aussenklauen beider Gliedmassenpaare durch das in ihren Ballenregionen beginnende Fussen (van der Tol et al., 2003; Meyer et al., 2007; Schmid et al., 2009), welches auf die Charakteristika des Vorführens der Gliedmassen und teilweise auf ihren längeren knöchernen Zehenstrukturen beruhen kann (Nacambo et al., 2007; Schwarzmann et al., 2007; Muggli et al., 2011), grösserem Stress ausgesetzt als die Innenklauen. Bei der heute weit verbreiteten Laufstallhaltung auf harten, unnachgiebigen Böden können die Aussenklauen bei Belastung nicht einsinken (Schmid et al., 2009; Nuss et al., 2014). So trugen sie während mehr als der Hälfte der Dauer der gesamten Fussungsphase bei Vorder- und Hintergliedmassen alleine die ganze Last, welche auf eine Gliedmasse fiel (Schmid et al., 2009). An den Hinterbeinen blieben nach den Untersuchungen von van der Tol et al. (2003) die Aussenklauen während 4 von 5 Abschnitten der Fussungsphase signifikant stärker belastet als die Innenklauen. Im Gegensatz dazu war das Gewicht an den Vorderbeinen bei diesen Autoren während der ganzen Stützbeinphase mehr oder weniger gleichmässig auf die beiden Klauen verteilt.

Für die Hintergliedmassen wurde postuliert, dass das Rind zusätzlich durch eine starre, knöchern-gelenkige Verbindung der Gliedmassen mit dem Rumpf bei jedem Schritt das Becken schief stellt (Kehler, 1998) und dabei Gewicht auf eine Seite verschiebt. Toussaint Raven (1998) berechnete, dass schon kleinste seitwärts gerichtete Bewegungen in der Hinterhand zu einer unausgeglichene Lastverteilung zwischen den Klauen einer Gliedmasse führten, und zwar zu Lasten der Aussenklauen. Diese Verschiebung der Last auf die Aussenklaue derjenigen Hintergliedmasse, in deren Richtung eine stehende Kuh geschoben wurde, konnte Müller (2018) erstmals belegen und quantifizieren. Für die Vordergliedmassen wird vermutet, dass eine gewisse Stossdämpfung gegeben ist (Benz et al., 2002). Verantwortlich dafür könnte die elastische, muskulotendinöse Aufhängung der Vordergliedmassen am Rumpf sein (Benz et al., 2002; Meyer et al., 2007; Schmid et al., 2009; Muggli et al., 2011). Diese könnte bei Belastung ein gewisses Abkippen der Beine gegen die Mediane hin – aufgrund der Längenunterschiede der Zehen – zulassen und so zu einer Gewichtsverlagerung von den Aussen- auf die

Innenklauen führen (Sigmund et al., 2010). Im Stand auf hartem Untergrund könnten die Innenklauen deshalb deutlich mehrbelastet und anfälliger für die Entwicklung von Sohlengeschwüren sein als die Aussenklauen (Muggli et al., 2011).

4.3. Zusammenhang zwischen Klauenbelastung und Klauenpflege

4.3.1. Funktionelle Klauenpflege

In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte Toussaint Raven in den Niederlanden eine Klauenpflege-Methode, welche den Anforderungen der Laufstallhaltung besonders gerecht werden sollte (Fiedler et al., 2004), die sogenannte „funktionelle Klauenpflege“ oder „Dutch Method“ (Toussaint Raven, 1985). Diese hat sich anschliessend weltweit als führende Klauenpflege-Methode etabliert (Vermunt, 1999). Ihr Ziel ist primär die Herstellung einer korrekten Gliedmassenstellung mit gleichmässiger Lastverteilung innerhalb eines Klauenpaares sowie eine ausgeglichene Gewichtsverteilung über die Sohlenflächen der Klauen (Toussaint Raven, 1998), wodurch lokale Belastungsspitzen und Überbelastungsschäden verhindert werden sollen. Durch die Korrektur von unterschiedlich hohen Klauen wird die Herstellung einer planen und ausbalancierten gewichtstragenden Fläche von Aussen- und Innenklaue angestrebt, welche senkrecht zur Gliedmassenachse steht (Toussaint Raven, 1998; Shearer und van Amstel, 2001; Paulus und Nuss, 2006; Lischer et al., 2014). Bryan et al. (2012) konnten nachweisen, dass das Lahmheitsrisiko bei Kühen mit geringem Höhenunterschied (0 mm bis 2 mm) zwischen den beiden Klauen einer Hintergliedmasse am tiefsten war. Die Innenklauen der Hintergliedmassen sollen laut Toussaint Raven (1985, 1998) als die „normaleren“ und gesünderen Klauen massgebend sein für die Aussenklauen. An den Vordergliedmassen sollen es umgekehrt die Aussenklauen für die Innenklauen sein (Toussaint Raven, 1985, 1998; Fiedler et al., 2004). Als Mass für die anzustrebende Dorsalwandlänge wurden von Toussaint Raven (1985) für eine ausgewachsene Holstein-Kuh 7.5 cm angegeben, wobei noch die Dicke des Sohlenhorns von 5 mm bis 7 mm dazu gezählt werden muss (Fiedler et al., 2019).

In den letzten Jahren wurden Aspekte der Toussaint Ravenschen funktionellen Klauenpflege hinterfragt und untersucht (Bell, 2015). So thematisierten mehrere Autoren die Problematik von nach funktioneller Klauenpflege zu dünn geschnittenen Klauen bei Einhalten der von Toussaint Raven vorgeschlagenen Richtlänge von 7.5 cm für die Dorsalwandlänge (Kehler,

1998; Burgi und Cook, 2008; Blowey und Inman, 2012; Archer et al., 2015). Verschiedene Arbeiten belegten die positive Korrelation der Dorsalwandlängen mit dem Alter (Nuss und Paulus, 2006; Archer et al., 2015), der Grösse und dem Gewicht der Tiere (Sohrt, 1999; Kehler und Sohr, 2000). Blowey und Inman (2012, 2013) schlussfolgerten aus ihren Untersuchungen von Schlachthof-Klauen der Hintergliedmassen, bei denen sie eine grosse Variabilität der Dorsalwandlängen der Klauenbeine (zwischen 49.9 mm und 76.4 mm) vorfanden, dass es möglicherweise nicht korrekt wäre, bei der Klauenpflege alle Klauen auf dieselbe fixe Dorsalwandlänge zu kürzen. Nach Tsuka et al. (2014) war eine Sohlendicke von 7 mm erst mit Dorsalwandlängen von 78 mm bis 80 mm verbunden. Archer et al. (2015) betonten ebenfalls das Risiko der Anwendung einer durchschnittlichen Länge für die Dorsalwand. Nach ihren Untersuchungen führte eine Dorsalwandlänge von 75 mm bei 95.0 % der Klauen von Hinterbeinen zu einer Sohlendicke von weniger als 5 mm. Anhand von Schlachtpräparaten von Kühen einer Milchviehherde errechneten sie eine Dorsalwandlänge von 85 mm für Tiere mit einem Alter unter 4 Jahren und eine von 90 mm bei älteren Tieren. Archer et al. (2015) empfahlen deshalb die Einhaltung von generell mindestens 90 mm Dorsalwandlänge für Holstein Friesian-Kühe, wobei sie die Klauenspitze belassen und nicht, wie nach der „Dutch Method“, abkniffen. Sie betonten, dass ihre Empfehlungen insbesondere für ungeübtere Klauenpfleger eine Hilfe darstellen können und dass es aufgrund von unterschiedlich gewählten anatomischen Messstartpunkten für die Dorsalwandlänge zu Unterschieden zwischen den Studien kommen kann. Nach Nuss und Paulus (2006) wiesen 28.8 % der Klauen von Fleckvieh-Kühen eine Dorsalwandlänge von 80 mm oder mehr auf. Als wichtigstes Kriterium zur Festlegung der einzustellenden Dorsalwandlänge bei der Klauenpflege wurde eine ausreichende Sohlendicke postuliert (Nuss und Paulus, 2006). Schilliger und Nuss (2012) (Schilliger, D., Nuss, K., 2012: Lehrfilm über die funktionelle Klauenpflege beim Rind. In: <https://tube.switch.ch/cast/videos/5fc5d4ac-b981-4092-938f-31b8ce334025>; letzter Zugriff: 09.01.2020) sowie Blowey (2015) erachten die Empfehlungen von Toussaint Raven für Dorsalwandlänge und Sohlendicke demnach als Richtlinien, wobei die Sohlendicke stets per Zangen- und Daumendruck überprüft und als limitierender Faktor angesehen werden sollte. Als valable Alternative zur Überprüfung der Sohlendicke bietet sich laut Kofler et al. (1999), van Amstel et al. (2003) und Laven et al. (2012) die Ultraschalluntersuchung an.

Nebst der Diskussion um die Dorsalwandlänge wird zudem die Empfehlung, mit der Pflege stets an der kleineren, „normaleren“ Klaue zu beginnen, in der schweizerischen Klauenpflegepraxis in Frage gestellt. Aufgrund der limitierenden Sohlendicke ist es nämlich gelegentlich

impraktikabel, die grössere Klaue der kleineren in der Höhe anzugleichen (Kümper, 1997). Auch Toussaint Raven (1998) bemerkte in seiner Anleitung zur funktionellen Klauenpflege, dass es nicht immer möglich sei, die Aussenklaue auf die Höhe der Innenklaue zu kürzen, ohne dass die Aussensohle zu dünn würde. In der Praxis wurde deswegen oftmals an der jeweils „längeren“ Klaue mit der Pflege begonnen, das heisst in der Regel an der Aussenklaue bei den Hinter- und an der Innenklaue bei den Vordergliedmassen. Allerdings führten die anatomischen Befunde, dass die lateralen Zehen bei beiden Gliedmassenpaaren um 2 mm bis 3 mm länger waren als die medialen (Nuss und Paulus, 2006; Nacambo et al., 2007; Schwarzmann et al., 2007; Nuss et al., 2011; Muggli et al., 2011, 2016), zu einer weiteren, zweiten Modifikation der funktionellen Klauenpflege: Und zwar sollte folglich nicht nur bei den Hinter-, sondern auch bei den Vordergliedmassen an den Aussenklauen, also an den Klauen mit den weiter nach distal reichenden Klauenbeinen samt Lederhaut, mit der Pflege begonnen und in einem zweiten Schritt die Innenklauen an diese angepasst werden, da an den Aussenklauen ansonsten Verletzungen der Klauenspitze oder zu dünne Sohlen das Resultat sein konnten (Sigmund et al., 2010; Nuss et al., 2011; Lischer et al., 2014).

4.3.2. Grösse der Sohlenflächen

Zur Messung der Sohlenfläche führten viele Autoren post-mortem-Untersuchungen (Feszl, 1968; Nuss und Paulus, 2006; Paulus und Nuss, 2006; Sigmund, 2009; Sigmund et al., 2010; Nuss et al., 2011), aber auch in-vivo-Studien (Alsleben et al., 2003; Huth, 2004; Huth et al., 2004, 2005; van der Tol et al., 2004; Bruderer, 2015; Müller, 2018) durch. Die Sohlenflächen wurden aber nicht immer mit der gleichen Methodik gemessen, sondern sie wurden entweder direkt an den Klauen selber oder indirekt über die Kontaktfläche mit Drucksensoren erhoben. Für die Hintergliedmassen wurde festgestellt, dass die gewichtstragende Sohlenfläche der Aussenklaue grösser war als diejenige der Innenklaue (Feszl, 1968; Spielmann, 1990; Kehler und Gerwing, 2004). Auch Nuss und Paulus (2006) sowie Paulus und Nuss (2006) bestätigten die anatomische Asymmetrie des lateralen und medialen Hornschuhs der Hintergliedmassen: Die lateralen Klauen hatten bei standardisierter Sohlendicke eine längere und breitere Sohle respektive eine grössere Sohlenfläche als die medialen. An den Klauen der Vordergliedmassen waren die Unterschiede bezüglich der Sohlenflächen zwischen Aussen- und Innenklaue nach Feszl (1968) sehr gering. Nach Hubert und Distl (1994) sowie Spielmann (1990) war die Fussungsfläche der Innenklaue jedoch grösser als diejenige der Aussenklaue. Sigmund

(2009), Sigmund et al. (2010) und Nuss et al. (2011) stellten fest, dass die Aussenklauen der Schultergliedmassen zwar breiter, die Innenklauen aber länger waren. Die Fussungsfläche war bei Kühen sowie bei Mastbullen an der Innenklaue signifikant grösser, bei weiblichen Rindern jedoch an beiden Klauen gleich gross.

Die Angaben zur Grösse der Sohlenflächen differieren in der vorliegenden Literatur bei Anwendung von indirekten Flächenmesssystemen sehr. Die Sohlenfläche der beiden Klauen einer Hintergliedmasse betrug nach Müller (2018) im Mittelwert 82.3 cm² vor Klauenpflege und 81.0 cm² nach Klauenpflege. Gerwing (2003), van der Tol et al. (2004) sowie Bruderer (2015) massen deutlich geringere Werte: Gerwing (2003) konnte vor Klauenpflege eine Auftrittsfläche für die beiden Klauen einer Hintergliedmasse zusammen von 47.0 cm², van der Tol et al. (2004) eine solche von 27.5 cm² feststellen. Bei beiden Untersuchungen kam es – im Gegensatz zu Müller (2018) – durch die Klauenpflege zu einer Flächenzunahme, nach Gerwing (2003) auf 53.1 cm², nach van der Tol et al. (2004) auf 40.0 cm². Bruderer (2015) mass an gepflegten Klauen einer Hintergliedmasse eine mit van der Tol et al. (2004) vergleichbare Fläche von 40.4 cm².

Die direkten Messungen der Sohlenfläche von Nuss und Paulus (2006) ergaben für die (un gepflegte) Sohlenfläche eines Hinterbeins 80.0 cm² für Kühe unter 36 Monate Lebensalter und 100.6 cm² für Kühe über 36 Monate Lebensalter. Diese Angaben stimmen mit ebenfalls direkten Messungen von Fessl (1980) recht gut überein. Die Sohlenfläche der Aussenklaue wurde durch die Klauenpflege nach Nuss und Paulus (2006) bei beiden Altersgruppen vergrössert: von 44.2 cm² auf 47.7 cm² respektive von 57.7 cm² auf 60.4 cm². Krebs et al. (2011) massen die Sohlenfläche gleichfalls mit direkten Abnahmen (Umrisszeichnung, Analysesoftware) und stellten an einer Gliedmasse mit ungepflegten Klauen durchschnittlich 67.0 ± 7.4 cm² bei einer ersten Gruppe von 16 Kühen und 88.0 ± 8.6 cm² bei einer zweiten Gruppe von 16 Kühen fest. Diese Werte liegen im Bereich der indirekt ermittelten Werte von Müller (2018).

Müller (2018) stellte allerdings insgesamt an einer Hintergliedmasse von vor zu nach Klauenpflege keine Flächenzunahme, sondern eine Flächenabnahme fest, wobei diese nur an der Aussenklaue und nicht an der Innenklaue stattfand. Die Autorin erklärte dies einerseits mit der im Rahmen der Klauenpflege angebrachten Hohlkehlung, andererseits mit dem nach Klauenpflege (durch das Angleichen der Höhen von Aussen- und Innenklaue) eher stattfindenden Kontakt der Innenklaue mit dem Untergrund und deren somit grösseren Kontaktfläche mit den Drucksensoren.

4.3.3. Veränderung der Klauenbelastung durch Klauenpflege

Toussaint Raven (1971, 1973) postulierte, dass unmittelbar nach funktioneller Klauenpflege eine Lastverteilung von 50.0 % zu 50.0 % zwischen Aussen- und Innenklaue der Hintergliedmassen vorhanden sei. Unmittelbar nach Klauenpflege war die Lastverteilung zwischen Aussen- und Innenklaue einer Hintergliedmasse auch nach Gerwing (2003) und Kehler und Gerwing (2004) beinahe ausgeglichen, bei einer Untersuchung nach 6 Wochen war die Belastung der Aussenklaue aber wieder angestiegen. Nach Zeiner et al. (2007) trug die Aussenklaue nach Klauenpflege nur noch 45.0 % der Gliedmassenlast, im Gegensatz zu 75.0 % vor Klauenpflege. Nach anderen Autoren konnte durch funktionelle Klauenpflege weder zwischen den Einzelklauen der Schulter- noch zwischen denen der Beckengliedmassen eine ausgeglichene Lastverteilung erreicht werden. Hubert (1993) stellte fest, dass es nach Klauenpflege zwar zu einer starken Verringerung der Belastungsdifferenz zwischen medialer und lateraler Klaue einer Vordergliedmasse kam, dass die Innenklaue aber fortwährend die stärker belastete Klaue blieb. So trug diese vor Klauenpflege bei Schwarzbunten Kühen 60.0 % und beim Fleckvieh 66.0 % der Gliedmassenlast, und 6 Wochen nach Klauenpflege war sie immer noch stärker belastet, allerdings nur noch mit 54.0 % respektive 60.0 % Gliedmassenlastanteil. Nach van der Tol et al. (2004) wurden vor Klauenpflege die Aussenklauen mit 80.0 %, die Innenklauen mit 20.0 % der Gliedmassenlast belastet. Durch die Klauenpflege wurde die Lastverteilung nur relativ leicht verändert und betrug 70.0 % zu 30.0 %. Die Druck- und Kraftmessungen von Bruderer (2015) fanden unmittelbar nach Klauenpflege statt; es war nicht zu einem Lastausgleich zwischen den Einzelklauen einer Gliedmasse gekommen. An den Vordergliedmassen war die Innenklaue mit 64.6 % und an den Hintergliedmassen die Aussenklaue mit 68.2 % der Gliedmassenlast mehrbelastet. Auch nach Cardona Gavaldon (2018) waren an den Vordergliedmassen nach wie vor die Innenklauen (mit 75.5 % der Gliedmassenlast) und an den Hintergliedmassen die Aussenklauen (mit 66.0 % der Gliedmassenlast) die stärker belasteten Klauen. Nach Müller (2018) trugen die gepflegten Aussenklauen der Hinterbeine 64.0 % der Gliedmassenlast.

Hinsichtlich der Belastungen nach Klauenpflege stellten viele Autoren sowohl an den Klauen der Vorder- als auch der Hintergliedmassen eine Zunahme der Fussungsflächen und eine damit verbundene Druckreduktion fest (Spielmann, 1990; Gerwing, 2003; Kehler und Gerwing, 2004; van der Tol et al., 2004). Unter den Aussenklauen der Hintergliedmassen wurden geringere mittlere Drücke gemessen, unter den Innenklauen aufgrund der Belastungszunahme

aber grössere – trotz der Flächenzunahme (Gerwing, 2003). Weiter stellten Gerwing (2003), Kehler und Gerwing (2004) sowie Carvalho et al. (2005, 2006) fest, dass insbesondere die Ballenregion der Aussenklaue einer Hintergliedmasse durch die „Aufrichtung“ der Klaue im Rahmen der Klauenpflege entlastet werden konnte und dass es zu einer Verschiebung des Schwerpunktes von der Ballenregion der Aussenklaue in die Spitzenregion der jeweiligen Innenklaue kam. Van der Tol et al. (2004) sowie Müller (2018) massen allerdings nach Klauenpflege die höchsten mittleren Drücke innerhalb einer Hintergliedmasse immer noch in der Ballenregion der Aussenklaue. Laut Hubert (1993) sowie Mülling und Pesenhofer (2018) konnte durch das Ausschneiden einer Hohlkehlung die Belastung dieser zentralen Klauenzonen respektive das Vorwölben der Lederhaut bei Belastung aber nicht verhindert werden.

4.3.4. Entlastung einer Klaue durch Klauenpflege

An den Hintergliedmassen soll im Rahmen einer therapeutischen Klauenpflege in der Regel die Aussenklaue entlastet werden, was erfordert, dass die Innenklaue höher belassen wird (Toussaint Raven, 1998; Fiedler et al., 2004; Lischer et al., 2014). Laut einer Fachinformation (Mülling und Pesenhofer, 2018) muss die Höhendifferenz zwischen der «Trachte» der zu entlasteten Aussenklaue und derjenigen der Innenklaue einer Hintergliedmasse mindestens 1 cm betragen. Der Entlastungsschnitt muss dabei unmittelbar am Ende des axialen Tragrands beginnen und den gesamten plantaren Bereich umfassen.

Über die Biomechanik der Vordergliedmassen ist weniger bekannt als über diejenige der Hintergliedmassen. Dass ein Kothurn auch Klauen der Vordergliedmassen zu entlasten vermag, wurde empirisch seit langem umgesetzt. Aber ob durch eine entlastende Klauenpflege analog zu den Hintergliedmassen, also durch das Höherlassen der Aussenklauen im Vergleich zu den Innenklauen, auch wirklich eine Entlastung letzterer erreicht wird, wurde bisher noch nicht untersucht. Durch verschiedene Untersuchungen ist allerdings belegt, dass bei gleichem Sohlenniveau kein Lastausgleich erreicht wurde (Hubert, 1993; van der Tol et al., 2004; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018), sondern weiterhin eine asymmetrische Belastung erfolgte. Sigmund et al. (2010) überlegten, dass ein leicht vermehrtes Abschleifen der Innenklauen im Vergleich zu den Aussenklauen die Innenklauen vermutlich nicht entlasten würde, sondern sogar noch stärker belasten, weil dadurch ein Abkippen der Vordergliedmassen gegen die Mediane hin verstärkt werden könnte.

4.4. Kothurne – ein Therapiebaustein bei Klauenerkrankungen

4.4.1. Bedeutung der Entlastung einer erkrankten Klaue

Die Schmerzen, welche durch Sohlengeschwüre verursacht werden, können zwar durch entsprechende Medikation gelindert werden. Eine nachhaltig erfolgreiche Behandlung wird jedoch am ehesten durch lokale chirurgische Massnahmen und das Anbringen eines Kothurns auf die gesunde Partnerklaue erzielt (Toussaint Raven, 1998; Shearer und van Amstel, 2001; Shearer et al., 2013). In den Anfangsstadien einer Hornschuh-Schädigung ist die korrektive Klauenpflege zielführend. Sie umfasst nach Toussaint Raven (1985, 1998) das vermehrte Abtragen des Sohlenhorns der betroffenen Klaue im Vergleich zur gesunden Partnerklaue. Falls alleine durch die funktionelle Klauenpflege keine ausreichende Höhendifferenz (Mülling und Pesenhofer, 2018) geschaffen werden kann, ist das Anbringen eines Klotzes an die gesunde Klaue angezeigt (Toussaint Raven, 1985, 1998; Shearer und van Amstel, 2001; Nuss und Fiedler, 2004). Den Vorteil der Höherstellung der kranken Klaue sieht Toussaint Raven (1998) in deren Ruhigstellung und einer geringeren Gefahr einer weiteren Schädigung der kranken Klaue. Zudem resultiert die Entlastung in geringeren Schmerzen und somit verbessertem Wohlbefinden, aber auch in einer schnelleren Heilung des Defektes (Blowey, 1998b; Toussaint Raven, 1998; Shearer et al., 2013). Es gilt zu beachten, dass Kothurne aber unbedingt nur an gesunde Klauen, das heisst an solche ohne Defekte in den Klauensohlen und mit genügender Sohlendicke, anzubringen sind (Lischer et al., 2014).

4.4.2. Sorten von Kothurnen

Es gibt heutzutage viele verschiedene Kothurne zur Entlastung einer erkrankten Klaue: Holzklötze (mit verschiedenen Kleber-Systemen wie beispielsweise dem Technovit[®]-, dem Demotec[®]- oder dem Bovi-BondTM-System), Kunststoffklötze/-schuhe (wie der Easy Bloc[®] von Demotec[®] oder der CowslipTM) oder Schaumstoffklötze (wie der Walkease[®] von Shoof International Ltd). Jedes dieser Systeme hat Vor- und Nachteile. Grundsätzlich gelten Kunststoffkothurne als einfach anzubringen, gut haftend, aber stärker abnutzungsgefährdet. Holzkothurne sind umständlicher zu befestigen und gehen in der Regel auch früher verloren, nutzen sich hingegen weniger schnell ab, wenn sie aus Hartholz bestehen (Nuss und Tiefenthaler, 2000). Früher wurden Holz- oder Kunststoffklötze noch mittels speziellen Huf-Nägeln an den Klauen befestigt. Heute werden die Klötze hingegen an die Klauen geklebt, und zwar meist

mittels einem Zweikomponentenkleber (entweder mit einem Polymethylmethacrylat-Klebstoff wie Technovit[®] oder einem Polyurethanklebstoff wie Bovi-BondTM) oder wie beim Walkease[®] mit Sekundenkleber (aus Cyanacrylaten). Wichtig ist, dass sich die Form und Abmessung der Kothurne stets den Klauenmassen anzupassen hat, und nicht umgekehrt (Nuss und Tiefenthaler, 2000). Die Kothurne sollen im Klauenspitzenbereich bündig enden, im Ballenbereich jedoch die Sohlenfläche um die halbe Länge des weichen Ballens überragen (Nuss und Tiefenthaler, 2000; Fiedler, 2012; Steiner, 2014). Bei zu kurzen Klötzen besteht die Gefahr einer Überlastung des Ballenbereichs, insbesondere der tiefen Beugesehne (Nuss und Tiefenthaler, 2000; Fiedler, 2012). Auch eine ausreichende Höhe der Kothurne ist entscheidend: Die Nachbarklaue sollte möglichst keinen Bodenkontakt mehr haben (Nuss und Tiefenthaler, 2000). Weniger als 20 mm Höhe, wie es beispielsweise bei den Easy Blocs[®] oder den CowslipsTM der Fall ist, reichen dafür oftmals nicht aus (Fiedler, 2012). Besonders nach Klauenoperationen wird eine Höhe von 25 mm bis 30 mm empfohlen (Nuss und Tiefenthaler, 2000). Wie effizient ein 3 cm hoher Kothurn eine kranke Klaue entlasten kann, sollte im Rahmen der hier vorgelegten Untersuchung durch die Kräfte- und Druckmessungen quantifiziert werden.

Der Zweikomponentenkleber sollte stets nur auf die vordere Klotzhälfte aufgebracht werden, so dass der kaudale Ballenbereich nicht mit dem Kunststoffkleber in Kontakt kommt, sondern frei schweben kann (Nuss und Tiefenthaler, 2000; Fiedler, 2012; Steiner, 2014). Maierl et al. (2013) untersuchten in einer limitierten Studie eine neue Klotzform, und zwar keilförmige Klötze, welche im Ballenbereich einige Millimeter höher waren als im Klauenspitzenbereich. Sie stellten fest, dass sich gegenüber überall gleich hohen Klötzen der Lahmheits-Score schneller und ausgeprägter besserte. Bei Klauen mit niedrigem Ballen wurde eine gute Unterstützungsmöglichkeit durch solche keilförmigen Klötze postuliert (Fiedler, 2000); sie sollten zudem für eine Entlastung der tiefen Beugesehne sorgen (Sekul, W.: Entlastungshilfen für die Rinderklaue. In: <https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site>; letzter Zugriff: 29.01.2019).

4.4.3. Einsatz von Kothurnen

Laut der von Potterton et al. (2012) verfassten, evidenzbasierten Literaturübersicht über Behandlungsempfehlungen bei Klauenerkrankungen wurde bei 86.0 % respektive 87.0 % der Publikationen (zwischen den Jahren 2000 und 2011) das Anbringen eines Kothurns an die

gesunde Klaue bei Sohlengeschwüren respektive eitrig hohlen Wänden propagiert. Einer Umfrage von O'Callaghan et al. (2004) nach setzten 79.0 % der Tierärzte und 97.0 % der Klauenpfleger regelmässig Kothurne als Therapiemassnahme ein. Nach Shearer et al. (2013a) wurden Geschwüre von 87.0 % der Klauenpfleger und 77.0 % der Tierärzte mithilfe eines Kothurns behandelt. Inzwischen wird der Gebrauch von Kothurnen von 92.0 % der Landwirte als ein üblicher Therapie-Bestandteil bei Sohlengeschwüren oder eitrig hohlen Wänden angesehen (Horseman et al., 2013). Dabei empfanden 70.0 % der Landwirte die gewählte Therapie als effektiv und 68.0 % als praktikabel; allerdings bekundeten die Landwirte teilweise Schwierigkeiten bei der Applikation der Klötze und beanstandeten, dass die Kosten und der Zeitaufwand deren Praktikabilität etwas schmälerte.

Eine etwas ältere Untersuchung aus Kanada lieferte hingegen andere Zahlen zum Einsatz von Kothurnen: Bei einer gemeinsamen Prävalenz von Sohlengeschwüren und eitrig hohlen Wänden von 11.3 % in Laufställen und 5.3 % in Anbindeställen wurden lediglich bei 2.2 % respektive 0.3 % aller Kühe Kothurne angebracht (Cramer et al., 2008). Cramer et al. (2008) glaubten, dass dies einerseits mit den Kosten zusammenhängen könnte, andererseits aber auch mit dem bisher noch nicht gut dokumentierten positiven Effekt von Kothurnen. Experimentelle Studien zur Evaluation der Wirksamkeit von Kothurnen als Therapiebestandteil bei Klauenläsionen gibt es erst seit kurzem (Thomas et al., 2015; Cutler et al., 2015).

Dass Kothurne nicht nur bei Stallhaltung, sondern auch bei ganzjähriger Weidehaltung anscheinend problemlos eingesetzt werden können, zeigte eine neue Studie von Müller et al. (2018). Die Autoren untersuchten, welche Art von Kothurnen sich am besten für den Einsatz unter Weidebedingungen eignete. Sie kamen zum Schluss, dass ein Kunststoffschuh wie der CowslipTM am besten zu diesen Bedingungen passte, da dieser länger hielt als ein Holz- oder ein Schaumstoffklotz und sich zudem langsamer abnutzte. Schon die Untersuchung von Bloewey et al. (1999) hatte gezeigt, dass CowslipsTM lange an den Klauen haften blieben und lediglich zu 45 % von alleine und dies im Mittel erst nach 71.3 Tagen abfielen.

4.4.4. Nutzen der Kothurne

Kothurne wurden nach der zugänglichen Literatur um das Jahr 1950 zum ersten Mal eingesetzt (Büchlmann, 1948). Nachfolgend fanden sie sehr schnell Anwendung, besonders in Mitteleuropa und in den Jahren 1960 – 1980 (Breuer, 1963), und ermöglichten grosse Fortschritte

in der Klauenchirurgie (Nuss und Tiefenthaler, 2000). Ihre positive Wirkung war so offensichtlich, dass anfänglich gar keine und insgesamt bisher nur sehr wenige vergleichende Untersuchungen über die Details ihrer Anwendung angestellt wurden. Auch Toussaint Raven propagierte die Anwendung von Kothurnen im Rahmen seiner Klauenpflege-Methode (Toussaint Raven, 1985). Wegen ihrer offensichtlichen Vorteile setzten sich Kothurne in der Behandlung von Sohlengeschwüren und anderen schmerzhaften Klauenkrankheiten (Surborg, 1982; Nuss, 1988; Lischer, 2000) schnell weltweit durch.

Pyman (1997) verglich die drei Therapie-Varianten Holzklotz, Kunststoffschuh (CowslipTM) und Polsterverband. Kühe, welche einen Holzklotz oder einen Kunststoffschuh an die gesunde Klaue erhielten, zeigten schneller wieder einen normalen, lahmheitsfreien Gang als solche mit einem Polsterverband. Laven et al. (2008) verglichen die Therapie von erkrankten Klauen durch Erhöhung der gesunden Klaue mit einem Kunststoffschuh (CowslipTM) allein mit der durch Applikation eines nicht-steroidalen Entzündungshemmers sowie zuletzt mit einer Kombination der beiden Behandlungsmassnahmen. Sie fanden nur bei denjenigen Kühen, deren erkrankte Klauen zur Entlastung einen Schuh benötigten und dann noch zusätzlich einen Entzündungshemmer erhielten, einen kleinen, allerdings nicht signifikanten positiven Effekt auf die Besserung der Belastung und der Schmerzempfindlichkeit. Alle Therapievarianten führten über 100 Tage gesehen zu einer vergleichbaren, kontinuierlichen Besserung der Lahmheit. Thomas et al. (2015) untersuchten den Heilungserfolg durch alleinige funktionelle, therapeutische Klauenpflege, durch diese Klauenpflege plus einen Easy Bloc[®], durch funktionelle Klauenpflege plus Entzündungshemmer sowie durch alle drei Komponenten zusammen. Es bestand kein Unterschied im Behandlungserfolg zwischen alleiniger Klauenpflege und Klauenpflege plus Entzündungshemmer; der Unterschied zur Klauenpflege plus Kothurn war klein. Die Dreifach-Therapie hingegen war gegenüber der alleinigen Klauenpflege signifikant besser, was den Lahmheitsscore 0 am Tag 35 anging. Thomas et al. (2015) kamen zu etwas anderen Ergebnissen als Laven et al. (2008), jedoch waren sowohl die Ausgangslage, die Schmerzmittel, die Haltungsform als auch die Kothurne verschieden. Aber sowohl von Laven et al. (2008) als auch von Thomas et al. (2015) wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Kühen mit Kothurn allein und denjenigen mit einem Entzündungshemmer allein festgestellt. Thomas et al. (2015) vermuteten, dass das alleinige Anbringen eines Kothurns das Wohlbefinden der Tiere anfangs beeinträchtigte und die Kühe sich zuerst an die neue Belastungsverteilung zwischen den Klauen gewöhnen mussten. Der Entzündungshemmer allein habe Mühe, in der immer noch belasteten entzündeten Lederhaut zu wirken, wohingegen sei-

ne Wirkung dann gut zum Tragen komme, wenn zusätzlich ein Kothurn angebracht werde. Dann könne durch das entzündungshemmende Medikament auch gleich das Unwohlsein der Tiere aufgrund des Kothurns etwas gemildert werden. Cutler (2012) und Cutler et al. (2015) untersuchten die Effekte von therapeutischen Klauenkothurnen auf die Bewegung, das Verhalten und die Milchleistung von (gesunden) Milchkühen. Sie konnten aufzeigen, dass es in den ersten drei Tagen nach der Applikation eines Kothurns zu einer Zunahme des Bewegungsscores (Locomotion score) und zu Gangveränderungen kam. Den Grund dafür sahen die Autoren nicht in einer erhöhten Schmerzhaftigkeit, sondern in der veränderten Gliedmassenlänge, an welche sich die Kuh zuerst gewöhnen musste. Die Aktivität, das Liegeverhalten oder die Milchproduktion der Kühe blieben unbeeinflusst, was gegen ein durch Kothurne verursachtes Unwohlsein sprach. Letzteres wäre erwartungsgemäss mit reduzierter Bewegung sowie reduzierter Futteraufnahme verbunden.

4.4.5. Schädigende Auswirkungen von Kothurnen

Das Anbringen eines Klotzes birgt auch Risiken. Wie bereits erwähnt, sollten Kothurne nicht an bereits geschädigte Klauen angebracht werden. Ein Klotz kann aber auch eine gesunde Klaue überbelasten, insbesondere bei zu langer Anwendung (Greenough, 1997; Nuss und Tiefenthaler, 2000; Fiedler, 2004). Durch den stärkeren Abrieb des Kothurns im Ballenbereich und einer Aufwärtsrotation der Klauenspitze aufgrund des kontinuierlichen Hornwachstums besteht ab einer gewissen Zeit – durch die Verschiebung des Schwerpunktes nach kaudal – die Gefahr der Entstehung von Sohlengeschwüren unter dem Kothurn (Smedegaard, 1964; Shearer et al., 2013). Auf jeden Fall muss der korrekte Sitz eines Klotzes regelmässig überprüft werden. Dazu meinte Toussaint Raven (1998): „Schlecht passende oder schief angebrachte Klötze können durch Druck auf die kranke Klaue sehr nachteilig wirken“. Es müsse darauf geachtet werden, dass die axiale Kante des Kothurns nicht in den Ballen der kranken Klaue drücke und diesen noch weiter schädige (Toussaint Raven, 1985) sowie dass durch einen zu kurzen Kothurn nicht die Klauenspitze bei Belastung in die Luft zu ragen kommt und dabei die tiefe Beugesehne überbelastet wird (Blowey et al., 1999).

Eine erkrankte Klaue soll im Idealfall dank einem Kothurn an ihrer Partnerklaue weitgehend über dem Boden schweben und so möglichst keine Irritationen von aussen mehr erfahren (Cutler, 2012; Fiedler, 2012; Litzke und Rau, 2012). Gleichzeitig ist aber zu erwarten, dass

auf die „Kothurnklaue“ deutlich mehr Last fällt (Fiedler, 2012). Wie gross diese Kräftezunahme an der „Kothurnklaue“ ausfällt und wie effizient eine kranke Klaue durch einen 3 cm hohen Kothurn entlastet werden kann, wurde bisher noch nicht untersucht.

Rusterholz (1920) beobachtete zudem, dass ein Sohlengeschwür auch als „Sekundärleiden“ an der kontralateralen Gliedmasse auftreten könne, wenn eine Hintergliedmasse aufgrund eines schmerzhaften Zustandes eine Zeit lang nur wenig belastet und somit die kontralaterale Gliedmasse entsprechend stärker beansprucht werde. An dieser Gliedmasse könne in der Folge ein Sohlengeschwür entstehen, und zwar in der Regel an der Aussenklaue. Es wird vermutet, dass sich ein Kothurn ebenso schädlich auf die Belastung der Partnergliedmasse auswirken kann (Fiedler, 2012). Dies war jedoch bisher nicht Gegenstand von Untersuchungen.

4.5. Fragestellungen der hier vorgelegten Arbeit

Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit sollte erstens untersucht werden, wie ein Unterschied des Sohlenniveaus von 3 mm zwischen Aussen- und Innenklaue einer Vordergliedmasse die Belastungsverhältnisse zwischen den beiden Klauen beeinflusst, und welche Massnahme – das vermehrte Kürzen der Aussen- oder dasjenige der Innenklaue – zur Entlastung der Innenklaue führt (**Fragestellung 1**). Zweitens sollte die Frage beantwortet werden, wie sich ein Kothurn auf die Belastungsverhältnisse an der betroffenen Gliedmasse und diejenigen der übrigen Gliedmassen auswirkt (**Fragestellung 2**). Insbesondere interessierte hier, inwiefern ein Kothurn auch Risiken für Folgeschäden mit sich bringen könnte.

5. Tiere, Material und Methoden

5.1. Kühe und deren Vorbereitung auf die Messungen

Vor Messbeginn war mittels einer Power Analyse (mit $\alpha = 0.05$ und $\text{power} = 1$ minus $\beta = 0.80$) die mindestens nötige Stichprobengrösse, mit welcher signifikante Unterschiede bei den durchzuführenden Messungen zu erwarten waren, bestimmt worden. Diese betrug $N = 21$. Damit sicher genügend gültige Messresultate zur Auswertung vorlagen und weil die Unterschiede, die in die Power Analyse einflussen, nur geschätzt waren, wurde schliesslich mit 30 Versuchstieren gearbeitet.

Zwischen Oktober 2015 und November 2016 wurden 30 Milchkühe der Rassen Brown Swiss ($n = 14$), Holstein ($n = 8$) und Rotfleckvieh ($n = 8$) untersucht. Aufgrund eines Fehlers im Messsystem (siehe 5.4.) mussten 2 Kühe (eine Holstein- und eine Rotfleckvieh-Kuh) nachträglich aus der Studie genommen werden. So verblieben noch 28 Kühe (14 Brown Swiss-Kühe, 7 Holstein-Kühe und 7 Rotfleckvieh-Kühe), von welchen die Messdaten ausgewertet wurden (Abb. 1 und 2).

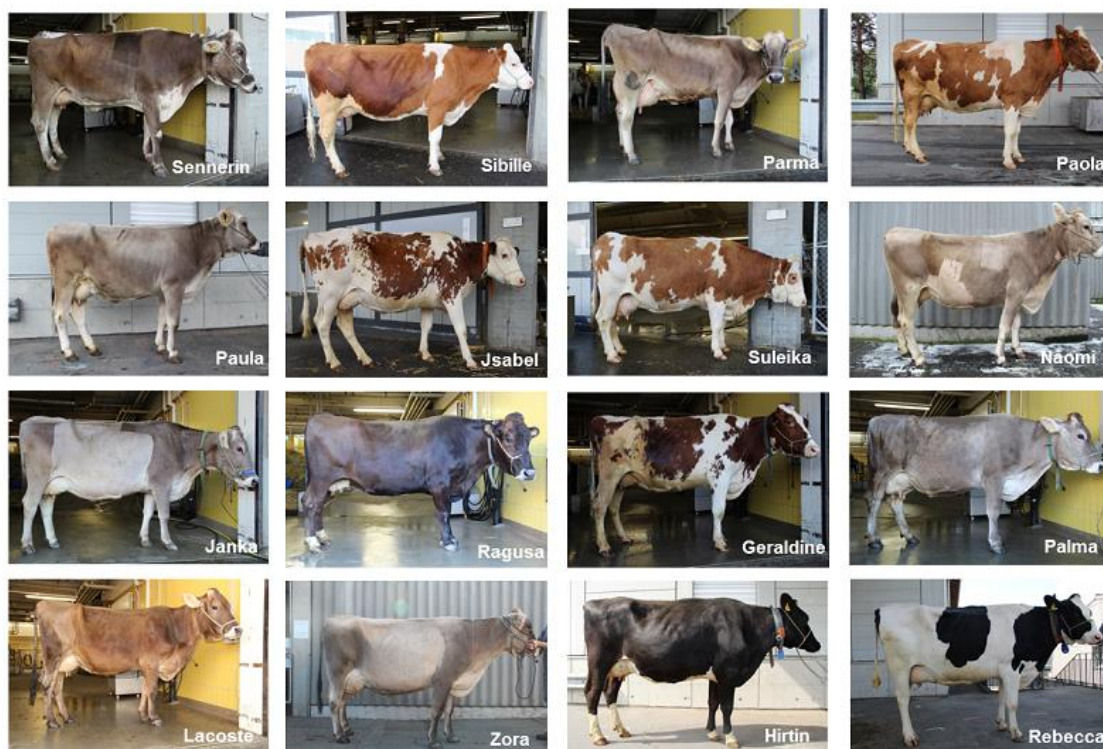


Abbildung 1: Für die Messungen verwendete Kühe Nr. 1 bis 16.



Abbildung 2: Für die Messungen verwendete Kühe Nr. 17 bis 30 (die Kühe Fleur und Iluna mussten nachträglich aus dem Versuch ausgeschlossen werden).

Bei Versuchseintritt jeder Kuh wurden zuerst eine allgemeine klinische Untersuchung und eine Lahmheitsuntersuchung durchgeführt. Die Kühe durften keine erhöhte rektale Körpertemperatur haben und mussten lahmheitsfrei sein. Des Weiteren durften die Tiere zum Zeitpunkt der Messungen nicht unter dem Einfluss von Analgetika oder Sedativa stehen. Tierindividuelle Daten, das heisst Rasse, Alter, Laktationszahl, aktuelle Milchleistung, Trächtigkeitsstadium, Haltungsform sowie der zeitliche Abstand zur letzten Klauenpflege, wurden mithilfe der Angaben auf dem Agate-Portal (<https://www.agate.ch>) und nach Rücksprache mit dem jeweiligen Besitzer erhoben und in tabellarischer Form festgehalten (siehe Anhang, Tab. 52). Weiter wurden die Kühe gewogen, da ihr Körpergewicht für die Berechnung der prozentualen Gewichtsverteilung auf die Gliedmassen und Klauen unabdingbar war. Das Körpergewicht wurde auf einer geeichten Brückenwaage bestimmt.

Die 28 Kühe waren zwischen 29 Monate und 73 Monate alt ($\mu = 48.0$, $\sigma = 13.6$) und befanden sich in der ersten bis vierten Laktation ($\tilde{x} = 2.0$, Min = 1, Max = 4; für Häufigkeitsverteilung siehe Abb. 3). Mit Ausnahme einer Kuh, welche gerade galt gestellt worden war, waren alle Kühe laktierend. Die von den Besitzern angegebenen momentanen Tagesgemelkmengen ihrer

Kühe lagen zwischen 10 Litern und 23 Litern und im arithmetischen Mittel bei 16.5 Litern ($\sigma = 3.7$). Während der Versuchsperiode waren 2 Kühe nicht tragend, 26 waren tragend, und zwar zwischen 0.8 Monaten und 7 Monaten ($\bar{x} = 5.0$). Die Tiere wogen zwischen 520 kg und 750 kg ($\mu = 637.4$, $\sigma = 58.8$; siehe Abb. 3) und hatten einen Body Condition Score (BCS, nach Edmonson et al., 1989) zwischen 2 und 4 ($\bar{x} = 2.5$). Ihre letzte Klauenpflege lag 1.5 Monate bis 9 Monate ($\bar{x} = 3.5$) zurück.

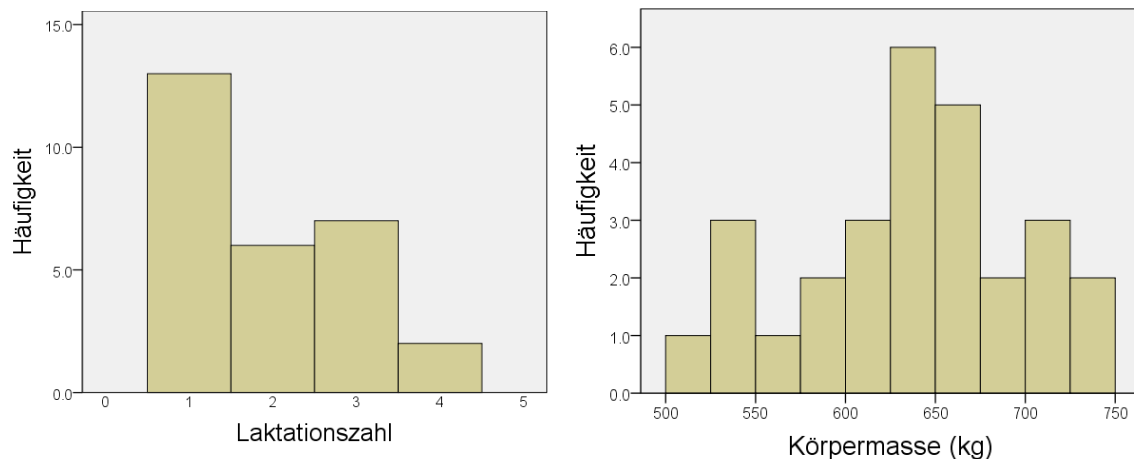


Abbildung 3: Histogramme zur Veranschaulichung der Häufigkeitsverteilung der Kühe nach Laktationszahl (links im Bild) und nach Körpermasse (rechts im Bild; separater Balken pro 25 kg).

Ungefähr eine Hälfte der Kühe kam aus einer Laufstall-, die andere aus einer Anbindehaltung. Genauer: 12 Kühe kamen aus dem Laufstall der Landwirtschaftlichen Schule „Strickhof“ in Lindau ZH (seit 2017 neu AgroVet-Strickhof), 11 vom ehemaligen Aussenbetrieb des Tierspitals mit Anbindehaltung („Stigenhof“ in Oberembrach ZH) und weitere 5 aus verschiedenen Betrieben in der Umgebung des Tierspitals Zürich (Mönchaltdorf ZH, Lauerz SZ, Rothernthurm SZ, Wila ZH, Mühlrüti SG), 2 davon mit Anbinde- und 3 mit Laufstallhaltung.

Vor Verwendung der Kühe für die geplanten Messungen wurde beim Veterinäramt des Kantons Zürich ein Bewilligungsgesuch für einen Tierversuch eingereicht (e-TV Nr. 26789). Dieses wurde genehmigt und die Versuche in den Schweregrad 0 (ohne Belastung für die Tiere) eingestuft. Im Rahmen des jährlichen Berichts an die Tierversuchskommission wurde von Seiten der Studiendurchführenden ein kleiner Zwischenfall gemeldet: Eine Kuh hatte sich im Klauenstand leicht verletzt (oberflächliche Wunde). Diese Wunde wurde versorgt und heilte komplikationslos ab. Ansonsten waren keine besonderen Ereignisse aufgetreten und alle Kühe

konnten nach Beendigung der Messungen wieder gesund in ihre Herkunftsbetriebe entlassen werden.

Während der Versuchsperiode wurden die Kühe im Anbindestall des Tierspitals Zürich auf Lägern mit Gummimatten und Stroheinstreu gehalten (Abb. 4). Gefüttert wurden die Tiere mit Heu, je nach Herkunftsbetrieb mit Gras- und Maissilage, sowie Kraftfutter und Mineralfutter. Die Kühe wurden zweimal täglich gemolken und die Milchmengen festgehalten ($\mu = 14.9$ Liter, $\sigma = 3.9$, Min = 8, Max = 23). Diese Tagesgemelke stimmten gut mit denen in ihrem Heimbetrieb überein, was sich in einer auf dem Niveau von $p < 0.01$ signifikanten, stark positiven Korrelation zeigte (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.812^{**}$). Wenn unterschiedlich, dann war die am Tierspital erbrachte Milchleistung der Kühe stets kleiner als die im Heimbetrieb.



Abbildung 4 (a-b): Aufstallung der Kühe während der Versuchsperiode im Anbindestall des Tierspitals Zürich, a) Läger von hinten betrachtet, b) Futterkrippe am Kopf der Läger.

Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase der Tiere fand zumeist am Folgetag des Versuchseintritts eine funktionelle Klauenpflege statt, entweder im Klauenstand (ohne Sedation) oder an der auf den Kipptisch abgelegten Kuh (Sedation mit Xylazin in einer Dosierung von 0.02 mg/kg intravenös) (Abb. 5). Die Klauen wurden nach einer nach Toussaint Raven (1985, 1998) modifizierten funktionellen Methode (Lischer et al., 2014) gepflegt. Die Aussenklauen

von Vorder- und Hinterbeinen wurden zuerst gepflegt und dann die Innenklauen angepasst. Aussen- und Innenklaue eines Fusses sollten zum Schluss gleich hoch sein, das heisst ihre Sohlenflächen sollten einander angeglichen worden sein und auf einer Ebene liegen (Hilfsmittel Klauen-Check[®] der Firma Demotec, Nidderau, Deutschland), wenn man die Klauen an den Dorsalwänden in der Hand hielt und über den Tarsus oder entlang des Metakarpus nach distal zu den Klauen schaute (Abb. 6).



Abbildung 5 (a-d): Funktionelle Klauenpflege im Klauenstand (a, b) oder auf dem Kipptisch (c, d).



Abbildung 6 (a-b): Überprüfen der Klauenhöhe von Aussen- und Innenklaue mithilfe des Klauen-Check® der Firma Demotec, Nidderau, Deutschland.

Im Rahmen der Klauenpflege wurden die Klauen auf Klauenhorn- und Klauenhautläsionen untersucht. Die Kühe durften keine lahmheitsrelevanten Läsionen an den Klauen aufweisen, also maximal nicht entzündlich veränderte, geweitete weisse Linien, leichtgradige Ballenhornfäule oder kleine (M1-Stadium) oder in Abheilung befindende (M3-Stadium) Dermatitis-digitalis-Läsionen.

An der auf den frisch gepflegten Klauen stehenden Kuh wurden anschliessend zwei Klauenmasse erhoben: Mit einem Rollmassband wurde die Dorsalwandlänge und mit einem elektronischen Winkelmesser der Dorsalwandwinkel bestimmt (zur Veranschaulichung siehe Abb. 7). Die proximale Grenze an der Dorsalwand der Klaue wurde als der spürbare Übergang zwischen Zehenhaut und Saumhorn (Nuss und Paulus, 2006; Sigmund et al., 2010; Nuss et al., 2011) des Klauenschuhs definiert. Der Zweck dieser Messungen bestand darin, eine gewisse Validierung der durchgeführten Klauenpflege zu ermöglichen und so einen Morphologie-Vergleich der Klauen der für die Versuche verwendeten Tiere mit solchen aus anderen Versuchen zu erhalten.

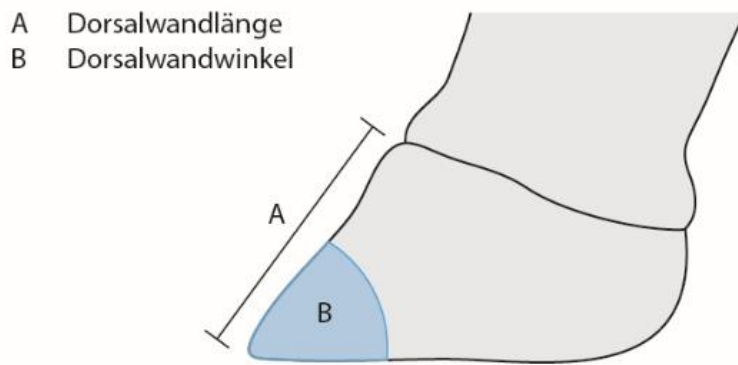


Abbildung 7: Schematische Darstellung (erstellt von: Jeanne Peter, Pascal Glatzfelder, Vetcom UZH) der gemessenen Parameter der Klauenmasse Dorsalwandlänge (A) und Dorsalwandwinkel (B).

Wieder einen Tag später fanden schliesslich die Kraft- und Druckmessungen im Messstand statt (Abb. 8). Je nach Temperament der Kuh war diese an den Vortagen bereits einige Male am Halfter über den Messstand hin- und hergeführt worden, damit sie sich an diesen Vorgang und die ungewohnte Umgebung gewöhnen konnte.



Abbildung 8: Kuh im Messstand, mit den Klauen der Vordergliedmassen auf der Schutzmatte über den beiden Messplatten (letztere nicht sichtbar).

Bevor die Kühe jeweils den Messstand betreten durften, wurden ihre Klauen mit dem Hochdruckreiniger gesäubert. So wurde verhindert, dass grobe Schmutzpartikel die Klauenmasse sowie die von der Druckmessplatte registrierten Klauenabdrücke verfälschen konnten.

5.2. Messsystem

Zur Ermittlung der Kräfte- und Druckverteilung unter den Klauen der Kühe stand die direkte Messmethode mittels einer Kombination von Kraft- und Druckmessplatte zur Verfügung. Um die Klauen in einer möglichst standardisierten Form (das heisst in stets gleicher Position, mit stets gleichem und ebenem Untergrund) vermessen zu können, wurde der in Abb. 8 gezeigte Messstand verwendet, in dessen Standfläche die Messplatten integriert worden waren.

5.2.1. Messstand

Dieser speziell für Messungen an stehenden Rindern angefertigte Messstand bestand aus einem metallenen Grundgerüst mit einer 255 cm langen und 106 cm breiten Standfläche (Abb. 9). Insgesamt fünf gartenbank-ähnliche Aluminium-Module, die die Abmessung der Kraftmessplatte aufwiesen, waren als Standfläche quer nebeneinander platziert. Zwischen dem ersten und zweiten dieser Module war die Kraftmessplatte ebenfalls quer zur Längsachse des Standes fest eingebaut. Darüber platziert waren zuerst eine in den Flächen-Dimensionen gleich grosse 0.6 cm dicke Plexiglasplatte und schliesslich die gleich grosse Druckmessplatte. Mit diesem Aufbau konnte die Belastung entweder beider Vorder- oder beider Hintergliedmassen gleichzeitig gemessen werden. Die gesamte Standfläche des Messstandes (ausser der Aussparung für die Messplatten) war von einer 8 mm dicken, schwarzen Gummimatte bedeckt; diese war fest an den Aluminium-Modulen verschraubt und ermöglichte ein komfortables Stehen. Die Druckmessplatte selber wurde mit einer 2 mm dicken, glatten, schwarzen Gummimatte (aus EVA-Kunststoff, vom Hersteller der Druckmessplatte zum Schutz empfohlen), die nur die Platte und ihre nahe Umgebung bedeckte, geschützt. Die gesamte Fläche des Messstandes wiederum wurde zuletzt von einer orange-farbigen, 5 mm dicken, glatten und sehr weichen Gummimatte bedeckt, die den gesamten Stand vor Verschmutzung schützte (Abb. 9). Der Messstand stand auf vier unabhängig voneinander höhenverstellbaren Füßen,

sodass stets ein horizontaler Stand garantiert werden konnte. Diese horizontale Ausrichtung des Standes wurde beim Aufbauen jeweils mit einer Wasserwaage überprüft.



Abbildung 9: Messstand in der Seitenansicht mit Messplatten unter schwarzer Gummimatte und orangefarbener Schutzmatte in der linken Hälfte (a), im Hintergrund Interface-Box und Laptop (b).

Die beiden Messplatten waren miteinander über eine Interface-Box als Schnittstelle verbunden und über diese wiederum an einen Laptop angeschlossen. Auf diesem war die Software „Balance“ (siehe 5.2.2.) installiert, die mit den von den Platten registrierten Daten Berechnungen durchführte und die Belastungssituationen unter den Klauen visualisierte.

Damit die Kühe während der Messungen möglichst ruhig an Ort und Stelle auf dem Messstand stehen blieben und nicht zur Seite ausweichen oder vor- und rückwärtsgehen konnten, waren an den Seiten sowie am Ein- respektive Ausgang des Messstands auf 93 cm Höhe Metallstangen als Abschränkungen angebracht worden. Die beiden kürzeren Querstangen am Ein- und Ausgang liessen sich jeweils gegen oben hin öffnen, damit die Kühe problemlos hinein- oder hinausgehen konnten. An beiden Enden des Messstandes wurde mittels Holzelementen (wiederum bedeckt mit etwa 2 cm dicken, schwarzen Gummimatten) eine Verlängerung des Messstandes geschaffen, sodass insgesamt eine Laufbahn mit einer Länge von über 9 m entstand (Abb. 10).



Abbildung 10: Messstand mit 9 m langer Laufbahn (Ansicht in Längsrichtung).

Dadurch mussten die Kühe sowohl beim Weg auf den Messstand als auch beim Weg hinunter vom Messstand keine grossen Höhenunterschiede überwinden. Dies erhöhte einerseits ihre Trittsicherheit, andererseits war dadurch zudem die Gefahr vermindert, dass die Kühe beim Verlassen des Messstandes zu starke Scherkräfte auf die Druckmessplatte ausübten. So gestaltete sich der Weg aus dem Messstand beinahe ebenerdig und die Druckmessplatte war gut vor grossen Scherkräften geschützt. Wenn eine Kuh Kot oder Harn absetzte, musste die orange-farbene Gummimatte jeweils sofort wieder gereinigt werden, damit die Kühe nicht ausrutschen konnten und es auch zu keiner Verfälschung der registrierten Klauenabdrücke durch grosse Schmutzpartikel kam.

5.2.2. Kraft- und Druckmessplatten sowie Mess-Software

Das für die Versuche eingesetzte Druckmesssystem stammte von der Firma RSscan International (Olen, Belgien). Zum Einsatz kam eine 1 m breite Hochgeschwindigkeits-Druckmessplatte, das sogenannte Hi-End-footscan[®]-System (Abb. 11). Diese Druckmessplat-

te wog 7.7 kg und hatte eine Dimension von 1068 mm x 418 mm x 12 mm. Dies entspricht einer Fläche von 0.45 m². Auf einem grossen Teil dieser Fläche (auf 0.32 m²) waren 8192 Sensoren mit einer Einzelfläche von 0.39 cm² (7.62 mm x 5.08 mm) verteilt.



Abbildung 11: Verwendete Druckmessplatte (RSscan International, Olen, Belgien).

Grundsätzlich kann eine halb so grosse, also 0.5 m breite, Hi-End-footscan[®]-Druckmessplatte mit 64 „Linien“ Daten mit einer Geschwindigkeit von maximal 500 Messungen (alle Messdaten enthaltende „frames“) pro Sekunde erfassen, das heisst mit einer Frequenz von bis zu 500 Hz. Da die 1 m breite Platte insgesamt aus zwei solchen Modulen mit je 64 „Linien“ aufgebaut war, die beide nacheinander gescannt wurden, betrug in diesem Fall die maximale Messgeschwindigkeit 250 Hz (also 250 Frames pro Sekunde). Für die hier durchgeführten Versuche wurde eine Messdauer von 2 Sekunden festgelegt. In dieser Zeit konnten also 500 Frames festgehalten werden.

Der Druckbereich, welcher registriert werden konnte, befand sich zwischen 1 N/cm² und 127 N / cm² (\cong 10 kPa bis 1270 kPa) respektive 0.4 N und 49.6 N je Sensorfläche. Der Schwellenwert zur Erkennung einer Belastung lag bei 1 N / cm², was 102 g / cm² entspricht. Beachtet werden musste stets der optimale Betriebstemperaturbereich von 15 °C bis 30 °C. Die Sensoren in der Druckmessplatte funktionierten nach der resistiven Technik. Das bedeutet, dass jeder Drucksensor eine Membran mit mehreren Dehnungsmessstreifen enthielt, welche unter dem Einfluss eines Druckes mechanisch verformt, also entweder gedehnt oder gestaucht wurden. Dabei änderte sich der elektrische Widerstand der Messstreifen jeweils direkt

proportional zum Druck. Diese Widerstandsänderung konnte schliesslich in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Grafisch aufgearbeitet wurden die Druckverteilungen schliesslich mit der Software „Balance“, eines von insgesamt drei Programmen der footscan®-7-Software-Version.

Die vertikalen Bodenreaktionskräfte, welche von den Drucksensoren registriert wurden, konnten mithilfe der Kombination der Druckmessplatte mit einer Kraftmessplatte laufend überprüft werden. So wurde bei jedem Mess-Frame die Summe aller vertikalen Kräfte, welche von den Drucksensoren registriert wurden, mit der von der Kraftmessplatte in z-Richtung gemessenen Kraft (z-Kraft beziehungsweise vertikaler Anteil der Bodenreaktionskraft) verglichen und, wenn nötig, automatisch angepasst. Diese durch die Synchronisierung der beiden Platten ermöglichte, sogenannte dynamische Kalibrierung war notwendig, weil die verwendeten resistiven Drucksensoren mit der Gebrauchszeit einen gewissen „Drift“ (eine Abweichung) bei der Widerstandsmessung erfahren konnten und andernfalls die gemessenen Kräfte leicht verfälscht worden wären (Hoffmann, 2018).

Die Kraftmessplatte wurde von der Firma AMTI (Watertown, Massachusetts, USA) extra für die Firma RSscan und passend zu deren 1 m breiten Druckmessplatte hergestellt (Abb. 12). Ihre Funktionsweise entsprach derjenigen der Kraftmessplatten der Firma Kistler, wie sie van der Tol et al. (2002, 2003, 2004) verwendeten, sodass in den Messsoftwares mit der Kalibrierungsmatrix einer Kistler-Kraftmessplatte („Kistler Protokoll“) gearbeitet werden konnte.

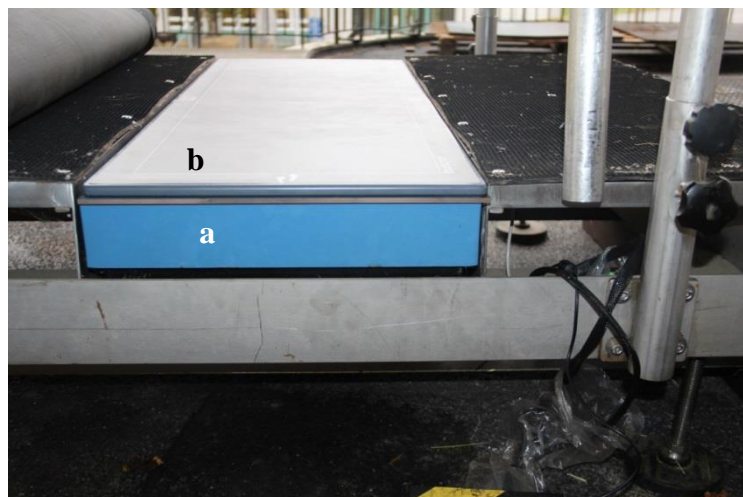


Abbildung 12: Kraftmessplatte (a) und Druckmessplatte (b) in der Seitenansicht. Zum Angleichen des Höhenniveaus wurde noch eine Plexiglasplatte unter die Druckmessplatte gelegt.

Die Kraftmessplatte (1070 mm lang, 420 mm breit, 180 mm hoch, 75 kg schwer) mass jeweils die Bodenreaktionskraft (GRF), welche einem Rinderfuss entgegenwirkte. Diese Bodenreaktionskraft bestand aus drei Kraftvektoren: einem in x- (senkrecht zur Laufrichtung; transversal), einem in y- (in Laufrichtung; longitudinal) und einem in z-Richtung (vertikal). Die Kraftanteile in x- und y-Richtung stellten Scherkräfte entlang der Oberfläche der Kraftmessplatte dar. In z-Richtung konnten Kräfte bis 10'000 N und in x- und y-Richtung bis 5000 N gemessen werden. Die Kräfte wurden wie die Drücke mittels Dehnungsmessstreifen gemessen. Das Prinzip der Kräftemessung mittels Dehnungsmessstreifen erklärt sich wie folgt: Das Auftreten einer Last bewirkte bei den sich an der Sensoroberfläche der Kraftmessplatte befindlichen zylindrischen Federkörpern (den sogenannten „Kraftaufnehmern“) eine Dehnung (also eine mechanische Verformung). Diese Dehnung bewirkte anschliessend bei den mit den Federkörpern verbundenen Dehnungsmessstreifen eine Änderung des elektrischen Widerstands. Dadurch wiederum veränderte sich proportional zur Kraft die Grundspannung bei den Dehnungsmessstreifen (AMTI Force and Motion: Sensortechnik und Konfiguration des Messsystems. In: https://www.amti.biz/fps-sensor-tech2_de.aspx; letzter Zugriff: 16.02.2019. MTS Messtechnik Schaffhausen GmbH: Kraftsensoren. In: <https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/kraftsensoren/kraftsensoren.html/60>; letzter Zugriff: 16.02.2019).

Die Kalibrierung von Druck- und Kraftmessplatte fand zu Beginn jedes Messtages statt. Anschliessend an die Kalibrierung wurde die Kraft auf der Platte auf 0 gesetzt, allerdings erst, wenn die beiden dünnen Gummimatten auf die Platten gelegt worden waren. Es wurde regelmässig eine Kontrollmessung mit den Füßen der Autorin dieser Dissertation durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Druckbilder zu überprüfen. Vor dem Start und nach der Hälfte der Versuche wurde die Druckmessplatte zum Ersetzen der druckempfindlichen Schicht (Pressure Sensitive Layer, PSL) nach Belgien eingeschickt. Vom Hersteller wird empfohlen, dies in jährlichen Abständen zu machen.

5.2.3. Messparameter

Mittels Kraft- und Druckmessplatte wurden folgende Parameter entweder direkt gemessen oder aus direkt gemessenen Parametern berechnet:

- Kraft (in Newton)

Es wurde jeweils die Bodenreaktionskraft gemessen, welche der Gewichtskraft (Masse in kg x Schwerebeschleunigung in N/kg [= 9.81]) der Klauen, die mit den Messplatten in Kontakt traten, entgegenwirkte. Deren vertikale Komponente (z-Richtung) entspricht in der Standphase genau der Gewichtskraft (ist ihr entgegengerichtet), weshalb im Folgenden stets von gemessenen „Gewichtskräften“ die Rede ist. Die registrierten Kräfte waren also stets abhängig vom Gewicht des jeweiligen Tieres. Das heisst, je schwerer ein Tier war, desto grösser war die Kraft, die gemessen wurde.

- Klauenabdruckfläche (in Quadratmillimetern)

Mittels der Anzahl durch die Klauen belasteter Sensoren wurden die Klauenabdruckflächen berechnet. Diese Flächenangaben mussten also nicht zwingend mit den realen Sohlenflächen der Klauen übereinstimmen. So war die maximale Genauigkeit der Flächenangaben nämlich abhängig von der Sensorgrösse, welche bei 0.39 cm^2 lag. Die Randzonen der gemessenen Klauen waren entsprechend ungenau abgebildet.

- Mittlerer und maximaler Druck (in Kilopascal)

Grundsätzlich wurde für jeden einzelnen Sensor ein Druckwert ermittelt. Dieser entsprach jeweils der Kraft pro Sensorfläche (also einer bestimmten Anzahl Newton pro 0.39 cm^2). Angegeben wurden die Drücke jeweils in der Einheit Kilopascal, wobei $1 \text{ N} / \text{cm}^2$ 10 kPa entsprachen. Für bestimmte grössere Flächen (wie beispielsweise die Abdruckfläche der Aus-senklaue) wurden die sogenannten „mittleren Drücke“ als arithmetische Mittelwerte aus den einzelnen Drücken der sich in der jeweiligen Fläche befindenden Sensoren berechnet. Weiter wurde für bestimmte Flächen der Maximaldruck, also der innerhalb der jeweiligen Fläche grösste von einem Sensor registrierte Druck angegeben. Schliesslich war für jede Messung und pro Gliedmasse diejenige Klauenzone bekannt, in welcher der Maximaldruck innerhalb einer Gliedmasse zu finden war.

- Abstände zwischen linkem oder rechtem Gliedmassenschwerpunkt und Gliedmassenpaarschwerpunkt sowie zwischen den beiden Gliedmassenschwerpunkten

Für jede Gliedmasse (linke und rechte getrennt) wurde der Abstand zwischen den Sensoren, in denen der Gliedmassenschwerpunkt und der Schwerpunkt des jeweiligen Gliedmassenpaares lagen, gemessen, und zwar jeweils in x- (seitlich) und auch in y-Richtung (vorne-hinten).

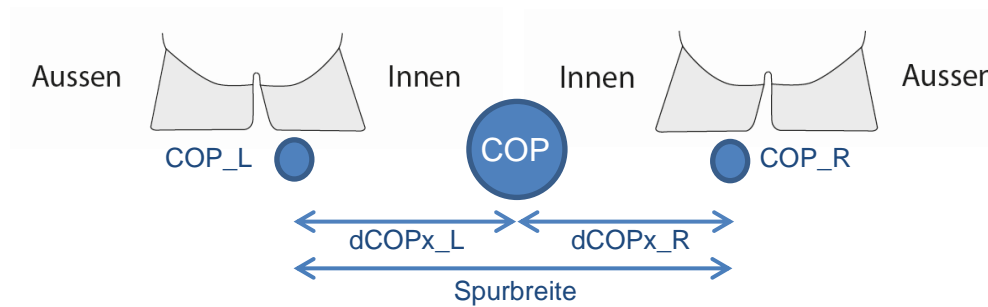


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Mittelwerte der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung (dCOPx_L, dCOPx_R) und der Spurbreite der Vordergliedmassen (modifiziert nach: Jeanne Peter, Pascal Glatzfelder, Vetcom UZH).

Weiter wurden von der Messsoftware die Summen dieser beiden Abstände (links und rechts) in x- und y-Richtung angegeben. Im Folgenden wird die Distanz zwischen linkem und rechtem Gliedmassenschwerpunkt in x-Richtung als „Spurbreite“ (Abb. 13) und diejenige in y-Richtung als „Vor-Rück-Beinabstand“ bezeichnet.

5.3. Versuchsablauf

Zuerst wurden die gepflegten Klauen der Vorder- und Hintergliedmassen ohne weitere Manipulation vermessen (Abb. 14, a). Diese Messsituation wird im Folgenden als „Ausgangssituation“ bezeichnet.

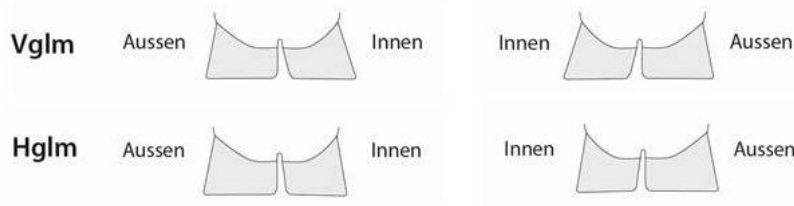
Zur Überprüfung der ersten Fragestellung wurden beide Aussenklauen der Vordergliedmassen – anschliessend an die funktionelle Klauenpflege – mithilfe von 3 mm dünnen Holzplättchen leichtgradig höher gestellt als die Innenklauen (zur Simulation eines vermehrten Kürzens der Innenklauen). Daran anschliessend wurden die Holzplättchen an beide Innenklauen der Vordergliedmassen angebracht (zur Simulation eines vermehrten Kürzens der Aussen-

klauen). Im Rahmen der zweiten Fragestellung wurde einerseits ein Kothurn an die Aussenklaue der linken Vordergliedmasse und andererseits ein solcher an die Innenklaue der linken Hintergliedmasse angebracht.

Nach den Messungen der Ausgangssituation folgten somit die Messungen mit **Holzplättchen** an beiden Aussen- und dann diejenigen mit Holzplättchen an beiden Innenklauen der Vordergliedmassen (Abb. 14, b-c) – bei den ersten 13 von 28 Kühen waren dabei nur die Vordergliedmassen, bei den folgenden 15 Kühen zusätzlich noch die Hintergliedmassen vermessen worden. Anschliessend wurden Messungen mit den **Kothurnen** an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse und an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse durchgeführt (Abb. 14, d-e), wobei jeweils auch die Vorder- und Hintergliedmassen mit gemessen wurden.

Messsituationen

a) Ausgangssituation (nach Klauenpflege)



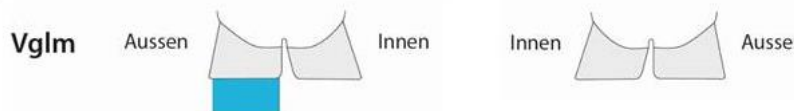
b) Holzplättchen an den Aussenklauen der Vordergliedmassen



c) Holzplättchen an den Innenklauen der Vordergliedmassen



d) Kothurn an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse



e) Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse

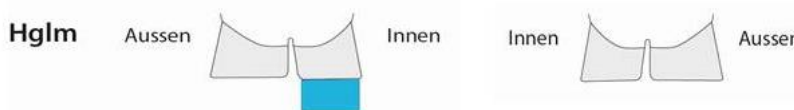


Abbildung 14: Übersicht über die fünf verschiedenen Messsituationen (a-e).

Bei den Kothurnen handelte es sich um 3 cm hohe und 12.5 cm lange nierenförmige Holzkothurne, welche nach dem Entwurf von Dr. Karl Nuss durch die Firma Demotec, Nidderau, Deutschland, aus Hartholz (definitionsgemäss mit einer Darrdichte $> 0.55 \text{ g/cm}^3$) angefertigt wurden (Abb. 15, a). Die Holzplättchen wurden in der gleichen Form wie die Kothurne mit einer Säge aus 3 mm dicken Sperrholzplatten gesägt (Abb. 15, b). Ihre Fläche wurde mithilfe einer Präzisionswaage (via Rückrechnung vom Gewicht eines Gegenstandes aus gleichem Material, aber mit bekannter Fläche von 100 cm^2) bestimmt und betrug 63.9 cm^2 .

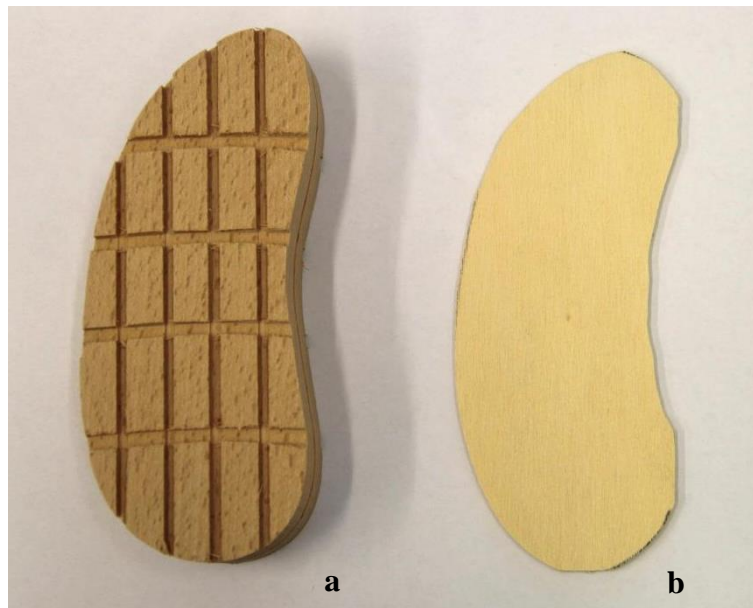


Abbildung 15: 3 cm hoher Holzkothurn (a) sowie 3 mm dickes Sperrholzplättchen in Klauenform (b).

Um die Holzplättchen und die Kothurne an die vorgesehenen Klauen anzubringen, wurde die Kuh in den Klauenstand gebracht und dort die jeweilige Gliedmasse hochgezogen (Abb. 16). Zur Befestigung der Holzplättchen und Kothurne wurde Tesa[®]-Klebeband (tesa, Norderstedt, Deutschland) verwendet. Insbesondere bei den 3 mm dünnen Holzplättchen musste gut darauf geachtet werden, dass nicht zu viel (im Idealfall 3 Streifen) Klebeband aufgebracht wurde, da dies die Höhe (und auch die Fläche) der Klauen rasch verfälschen konnte.



Abbildung 16 (a-b): Anbringen der Kothurne und Holzplättchen im Klauenstand, Kothurn an Aussenklaue der linken Vordergliedmasse (a), Kothurn an Innenklaue der linken Hintergliedmasse mit Tesa®-Klebebinde befestigt (b).

Jeweils direkt nach den Messungen (Abb. 17, a-d) wurden die Holzplättchen und Kothurne vom aufgehobenen Bein der Kühe wieder entfernt.



Abbildung 17 (a-d): Messsituationen mit Kothurnen (a, b) und Holzplättchen (c, d): a) Vordergliedmassen (Ansicht von schräg palmar) mit einem 3 cm hohen Kothurn an der Aussenklaue der linken Gliedmasse, b) linke Hintergliedmasse (Ansicht von plantar) mit 3 cm hohem Kothurn an der Innenklaue, c) Vordergliedmassen (Ansicht von dorsal) mit 3 mm dicken Holzplättchen an beiden Aussenklauen, d) Vordergliedmassen (Ansicht von dorsal) mit 3 mm dicken Holzplättchen an beiden Innenklauen.

Vor der Durchführung einer Messung wurde stets darauf geachtet, dass die Tiere möglichst parallel mit beiden Füßen auf den Messplatten standen. Mit der Software „Balance“ war auf dem Laptop stets der Schwerpunkt des Gliedmassenpaares sichtbar (als rotes Kreuz, Abb. 18). Zudem wurden die prozentualen Lastanteile der beiden Bereiche links und rechts einer feinen gelben Linie, die man zwischen den beiden Füßen platzieren konnte, angegeben. So war es möglich, bei der Ausgangssituation und bei den Messsituationen mit den Holzplättchen eine möglichst ausgeglichene Lastverteilung auf die beiden Gliedmassen zu erhalten. Auf dem Laptop konnte zudem laufend das Druckbild beurteilt werden. Die Verteilung der Drücke über die Klauenabdruckflächen war mit verschiedenen Farben dargestellt, wobei blau für einen kleinen und rot für einen grossen Druck stand (Abb. 18, für Farbschlüssel siehe Abb. 19).

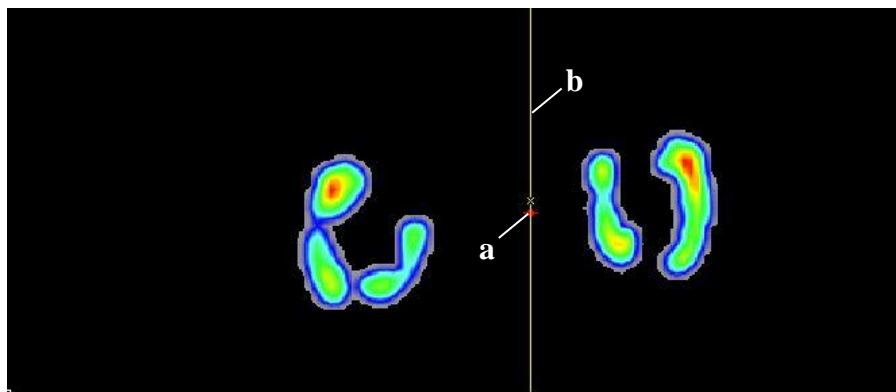


Abbildung 18: Druckbild einer Messung der Klauen der Hintergliedmassen bei der Ausgangssituation. Links im Bild = Klauen der rechten Hintergliedmasse, rechts im Bild = Klauen der linken Hintergliedmasse, oben im Bild: Ballenbereich. Rotes Kreuz (a) = Schwerpunkt des Gliedmassenpaares. Die gelbe Linie (b) diente zur Bestimmung der prozentualen Lastanteile auf den beiden Gliedmassen. Verschiedene Farben stehen für unterschiedliche Drücke: rot = grösster, grau = kleinster Druck.



Abbildung 19: Farbschlüssel für die Druckbilder: Zeigt auf, welche Farbe für welchen Druck steht ($1 \text{ N} / \text{cm}^2 = 10 \text{ kPa}$) (aus: RSscan International: Installationsanleitung und Benutzerhandbuch footscan® System mit footscan® 9. In: ftp://ftp.rsscan.com/footscan_9/essentials/RS-PRD-00563-016%20Installationsanleitung%20und%20Benutzerhandbuch%20Footscan%209.pdf; letzter Zugriff: 13.03.2019).

Pro Messsituation und Kuh sollten 3 Messungen durchgeführt und gespeichert werden. Bei einer Kuh und einer Messsituation waren fälschlicherweise nur 2 Messwiederholungen gespeichert worden. Bei einigen wenigen Tieren wurden mehr als 3 Messungen (bis zu 6) durchgeführt, nämlich dann, wenn sie bei den ersten 3 Messungen jeweils einen zu unterschiedlichen Stand eingenommen hatten.

5.4. Bearbeitung der Rohdaten

Aus den 500 Frames, die bei einer Messdauer von 2 Sekunden resultierten, wurde mittels einer bereits für die Vorgängerdissertation von Cardona Gavaldon (2018) entwickelten Excel-Makro-Datei zufällig 1 Frame ausgewählt. Dieses wurde sodann in einer sogenannten „Aus-

werter-Datei“ (ebenfalls im Excel-Format; Version 3.0, 2015, entwickelt von Dipl. El.-Ing. ETH Thomas Wiestner) geöffnet. Es war darin möglich, die einzelnen Sensoren, welche einen Druck gemessen hatten, den Klauen entweder beider Vorder- oder beider Hintergliedmassen und innerhalb der Klauen auch noch definierten Klauenzonen zuzuweisen. Diese Klauenzonen gliederten sich in Haupt- und Grenzzonen. Mit den Hauptzonen waren stets die beiden Spitzen- und Ballenzonen eines Klauenpaares gemeint. Als Grenzzonen wurden einerseits der Übergangsbereich zwischen Spitzen- und Ballenzone innerhalb einer Klaue und andererseits der Bereich zwischen den beiden Spitzenzonen eines Klauenpaares definiert. Insgesamt resultierten daraus 7 Klauenzonen pro Gliedmasse. In der „Auswerter-Datei“ wurden im Hintergrund die Kräfte- und Flächen-Werte der Sensoren in den Grenzzonen anschliessend halbiert und je zur Hälfte auf die beiden betroffenen Hauptzonen oder Klauen verteilt. Die Sensoren, welche sich in den oben genannten Zonen befanden, wurden in dieser Datei mit folgenden Codes beschriftet: l für linke Gliedmasse, r für rechte Gliedmasse, a für Aussenklaue, i für Innenklaue, 1 für Spitzenzone und 2 für Ballenzone, 12a oder 12i für die Grenzzone zwischen Spitzen- und Ballenzone innerhalb Aussen- oder Innenklaue und 1ai für die Grenzzone zwischen den beiden Spitzenzonen einer Gliedmasse (Abb. 20):

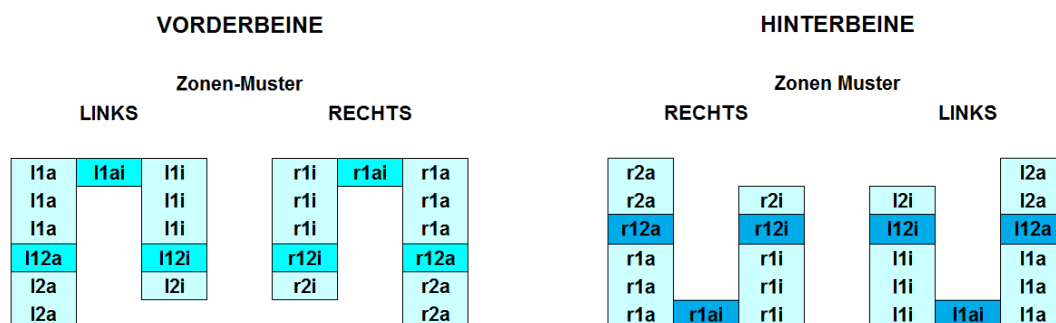


Abbildung 20: Zonen-Codierung an den Klauen der Vorder- (links im Bild) und Hintergliedmassen (rechts im Bild) (Ausschnitt aus der Auswerter-Datei). l = linke Gliedmasse, r = rechte Gliedmasse, 1 = Spitzenzone, 2 = Ballenzone, a = Aussenklaue, i = Innenklaue. Ausschnitt aus der „Auswerter-Datei“ (Version 3.0, 2015).

Um die Zuteilung der einzelnen Sensoren zu den Klauen und Klauenzonen zu erleichtern, wurden digitale Klauenschablonen zu Hilfe genommen, die man individuell in Grösse und Richtung anpassen und über den „aktiven“ Sensoren platzieren konnte (Abb. 21).

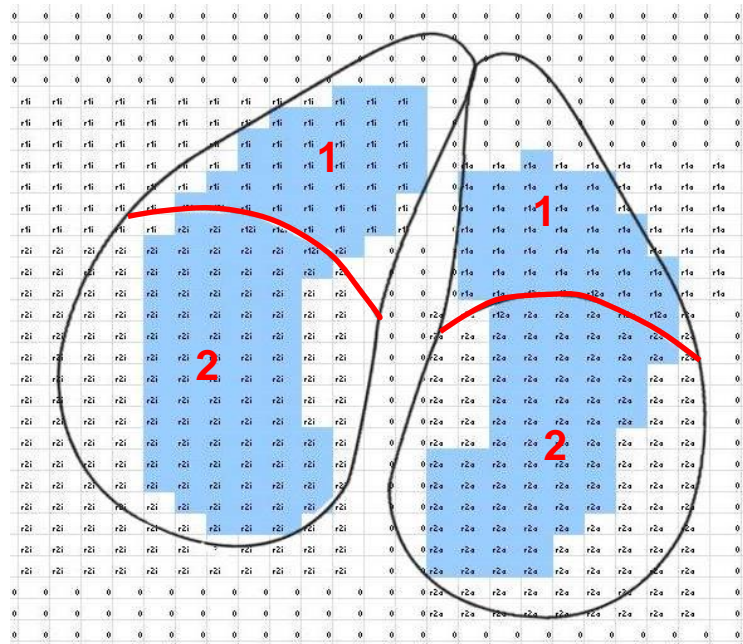


Abbildung 21: Klauenschablonen mit Unterteilung in Spitzenzone (1) und Ballenzone (2) über „aktiven“ und codierten Sensoren der Klauen der rechten Vordergliedmasse. Ausschnitt aus der „Auswerter-Datei“ (Version 3.0, 2015).

Mittels eines Algorithmus wurden schliesslich die Kräfte, die Abdruckflächen, die mittleren und maximalen Drücke auf Gliedmassen-, Klauen- und Klauenzonenlevel berechnet und in einer Resultate-Zeile zusammengefasst (Abb. 22). Die weiteren erhobenen Parameter, das heisst die Abstände eines Gliedmassenschwerpunktes vom Schwerpunkt des Gliedmassenpaares, die Abstände zwischen linkem und rechtem Gliedmassenschwerpunkt, sowie die Breite und Länge der Klauenabdrücke, waren am Ende jeder Resultate-Zeile aufgeführt.

nicht. Hier fielen bei 2 Kühen (Nr. 28 und 29) mehrere Unregelmässigkeiten auf: Und zwar wurde bei allen Messungen im Vergleich mit dem jeweiligen Gesamtgewicht der Kuh eine zu geringe Totalkraft gemessen. Zudem gab es grössere Variationen in den Totalkräften bei den Wiederholungsmessungen als üblicherweise. Die beiden betroffenen Kühe schieden folglich aus dem Versuch und den weiteren Analysen aus.

Bei den Messungen nach Klauenpflege (1-2) und mit den Holzplättchen (3-6) wurde jeweils diejenige von den 3 Messungen ausgewählt, bei welcher die Links-Rechts-Kräfteverteilung am nächsten bei 50.0 % zu 50.0 % lag. Da bei diesen Messsituationen bei linker und rechter Gliedmasse die gleiche Situation (Klauenpflege oder Holzplättchen) vorlag, wurden hier anschliessend für jede Kuh und jede Messsituation die Werte der beiden Gliedmassen paarweise gemittelt. Das heisst, es entstanden dann pro Parameter und Messsituation 28 neue gemittelte Werte (also 1 Wert pro Kuh). Aufgrund des Fehlens eines statistischen „Äquivalenztests“ konnte vor diesen Mittelungen „nur“ auf das Vorhandensein von statistisch signifikanten Unterschieden zwischen den Werten der linken und rechten Gliedmassen bei jedem einzelnen Parameter getestet werden. In 5 der gefundenen 7 Fälle mit einem statistisch signifikanten Unterschied waren lediglich Parameter auf Ebene der Klauenzonen betroffen.

Bei den Messsituationen hingegen, bei denen an jeweils eine Klaue der linken Gliedmasse ein Kothurn angebracht wurde (Messungen 7-10), war es unabdingbar, dass die linke und die rechte Gliedmasse getrennt erfasst und nicht gemittelt wurden. Gemittelt wurden stattdessen für jede Kuh und Messsituation alle jeweils pro Messsituation und Kuh angefertigten Messwiederholungen (zwischen 2 und 6), da hier die Belastungsverhältnisse zwischen linker und rechter Gliedmasse zwischen den Messwiederholungen deutlicher variierten als bei den oben genannten Messungen nach Klauenpflege oder mit Holzplättchen und so eine einzige Messung nicht repräsentativ erschien.

5.5. Statistische Datenanalyse und Berechnung weiterer Parameter

Die statistischen Analysen und Berechnungen erfolgten mit Microsoft Excel[®] 2010 (Microsoft Corporation, Redmont, Washington, USA) und IBM SPSS[®] Statistics 23 (IBM, Armonk, New York, USA).

5.5.1. Statistische Methoden

Alle Parameter wurden in einem ersten Schritt auf ihre Normalverteilung geprüft. Hierfür wurden die Q-Q-Plots betrachtet und Shapiro-Wilk-Tests durchgeführt (bei $p < 0.05$ lag keine Normalverteilung vor). Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurde anschliessend für alle Parameter (egal ob normal- oder nicht normalverteilt) der arithmetische Mittelwert (μ) und die Standardabweichung (σ) sowie für die nicht normalverteilten Parameter zusätzlich der Median (\tilde{x}), das Minimum und das Maximum ermittelt.

Zur Ermittlung von Unterschieden zwischen Gliedmassen, Klauen und Klauenzonen wurden Mittelwertvergleiche durchgeführt. Waren die zu vergleichenden Parameter beide parametrisch, wurde der t-Test mit verbundenen Stichproben hinzugezogen. Bei nicht parametrischen Daten kam der Wilcoxon-Vorzeichenrang-Test zum Einsatz. Als Signifikanzniveau wurde $p < 0.05$ festgelegt. Die Mittelwertvergleiche zwischen der Messsituation nach Klauenpflege und derjenigen mit Holzplättchen fanden mit den neuen, jeweils aus den Werten von linker und rechter Gliedmasse gemittelten Werten statt. Für die Vergleiche zwischen der Ausgangssituation und den Messsituationen mit Kothurn wurden aus ersterer stets die gemittelten Werte und aus den letzteren die von linker und rechter Gliedmasse separat stammenden Werte hinzugezogen.

Nebst den Mittelwertvergleichen zwischen den verschiedenen Messsituationen interessierte auch, bei wie vielen Tieren sich ein gewisser Parameter in welche Richtung bewegte (Zu- oder Abnahme) und um wie viel Prozent er im Durchschnitt zu- oder abnahm. Die Anzahl Tiere mit Zu- oder Abnahme eines bestimmten Parameters von der Ausgangs- zu einer Messsituation mit Holzplättchen oder Kothurn hin wurde stets ausgezählt. Die prozentualen Veränderungen von der Ausgangs- zu einer Messsituation mit Holzplättchen oder Kothurn hin konnten über die 28 Tiere nicht gemittelt werden, da sie nicht auf dem gleichen 100 %-Wert basierten. Aus diesem Grund wurde jeweils der Median dieser Prozentwerte angegeben. Die Prozentwerte bezogen sich dabei stets auf den Wert der Ausgangssituation.

Zur Beurteilung von Zusammenhängen zwischen 2 Variablen wurde jeweils der Korrelationskoeffizient r nach Bravais-Pearson (bei parametrischen Daten) oder nach Spearman (bei nicht parametrischen Daten) berechnet. Nach Cohen (1992) gilt folgende Einteilung bezüglich Effektstärke: $r = 0.1$ entspricht einem schwachen, $r = 0.3$ einem mittleren und $r = 0.5$ einem

starken Effekt. Zusätzlich angegeben wurde, ob eine Korrelation auf dem Niveau von $p < 0.01$ (gekennzeichnet mit **) oder $p < 0.05$ (gekennzeichnet mit *) signifikant war.

5.5.2. Weitere Berechnungen

Aus den oben beschriebenen, in der „Auswerter-Datei“ angegebenen Parametern Kraft, Fläche und Druck wurden die folgenden weiteren Parameter berechnet:

- das Körpergewicht der Tiere:

Aus den addierten Kräften in Newton bei Vorder- und Hintergliedmassen wurde das Körpergewicht der Tiere berechnet (Kraft in N geteilt durch 9.81 = Gewicht in kg). Dieses konnte dann mit dem auf der Waage gemessenen Gewicht der Tiere verglichen werden.

- die prozentuale Gewichtsverteilung:

Aus den mittels deskriptiver Statistik ermittelten arithmetischen Mittelwerten von 28 Gewichtskräften auf Gliedmassenpaar-, Gliedmassen-, Klauen- und Klauenzonenlevel wurde berechnet, wie sich das Gewicht der Kühe prozentual auf die beiden Gliedmassenpaare, auf linke und rechte Vorder- oder Hintergliedmasse, sowie auf Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Gliedmasse oder auf die Spitzen- und Ballenzone innerhalb einer Klaue verteilte.

- die prozentualen Flächenanteile:

Zur besseren Veranschaulichung der Grössenverhältnisse beider Klauen einer Gliedmasse wurden bei jeder Messsituation aus den Klauenabdruckflächen-Mittelwerten die prozentualen Flächenanteile der Aussen- und Innenklaue am Gesamtgliedmassen-Abdruck berechnet.

- die prozentuale Verteilung des Maximaldruckes auf die Klauen und Klauenzonen:

In der „Auswerter-Datei“ wurden nicht nur die Werte der Maximaldrücke pro Klaue und pro Klauenzone angegeben, sondern es wurde auch noch diejenige Klauenzone genannt, in welcher der grösste Druck innerhalb der gesamten Gliedmasse auftrat. Für jede Messsituation wurde folglich ausgezählt, wie häufig ein Maximaldruck pro Klaue und pro Zone vorkam. Bei der Ausgangssituation und bei den Messsituationen mit den Holzplättchen dienten die pro Messsituation 28 ausgewählten Einzelmessungen mit der am besten ausgeglichenen Kräfte-

verteilung als Grundlage. Bei den Messsituationen mit den Kothurnen, wo für alle anderen Parameter eine Mittelung über alle Messwiederholungen stattfand, wurden zur Ermittlung der Häufigkeiten der Maximaldrücke pro Klaue und pro Zone alle Messwiederholungen ausgezählt, da diese Angaben nicht gemittelt werden konnten. Aus den absoluten Häufigkeiten erfolgte schliesslich die Berechnung der prozentualen Verteilung (also der relativen Häufigkeit) des Gliedmassen-Maximaldruckes auf die Klauen und Klauenzonen.

6. Resultate

6.1. Ausgangssituation: Klauen nach funktioneller Klauenpflege

6.1.1. Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen

An den Vordergliedmassen wurde im arithmetischen Mittel (μ) eine Gewichtskraft von 3199.6 N (Standardabweichung $\sigma = 319.7$) und an den Hintergliedmassen eine von 2847.8 N ($\sigma = 239.9$) registriert. Der Unterschied dieser beiden Gewichtskräfte war signifikant. Die prozentuale Verteilung der Kräfte auf die beiden Gliedmassenpaare betrug (als Prozentsätze der Summe der Kräfte-Mittelwerte von Vorder- und Hintergliedmassen [6047.4 N]) 52.9 % für die Vorder- und 47.1 % für die Hintergliedmassen. Nach Addition der beiden Gewichtskräfte und Umrechnung in das Körpergewicht in Kilogramm bestand eine signifikante Differenz zum auf der Waage bestimmten Gewicht der Tiere: Und zwar war das gewogene Körpergewicht im Median 20.3 kg grösser als das aus den Kräften berechnete.

6.1.2. Messwerte für die Vordergliedmassen

6.1.2.1. Gewichtskräfte

Die an beiden Vordergliedmassen zusammen registrierte Kraft ($\mu = 3199.6$ N, $\sigma = 319.7$) war fast gleichmässig auf die beiden Gliedmassen verteilt: So bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Kräften von linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 1606.2$ N, $\sigma = 216.1$; $\mu_R = 1593.4$ N, $\sigma = 201.5$). Die prozentuale Lastverteilung auf die beiden Gliedmassen betrug – berechnet aus den beiden Kräfte-Mittelwerten – 50.2 % für die linke zu 49.8 % für die rechte Vordergliedmasse. Auf eine Vordergliedmasse (egal ob linke oder rechte) wirkte im Mittelwert eine Gewichtskraft von 1599.8 N (Tab. 1).

Tabelle 1: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Vordergliedmasse | | | |
|--------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | 1599.8 (159.9) | | | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 50.0 [#] | | | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen | 26.5 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| | 478.6 (247.1) | | 1121.2 (206.8) ^{*1} | |
| | $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) ^{*1} | | | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 29.9 | | 70.1 | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 15.0 | | 35.0 | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen | 7.9 | | 18.6 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) ^{*2,3} |
| | $\tilde{x} = 201.8$ | $\tilde{x} = 231.3$ | $\tilde{x} = 243.8$ | |
| | (Min = 86.2, | (Min = 0.6, | (Min = 84.4, | |
| | Max = 468.4) | Max = 576.7) ^{*3} | Max = 651.5) ^{*2} | |
| Anteil (%) an einer Klaue | 47.7 | 52.3 | 23.0 | 77.0 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 14.3 | 15.6 | 16.1 | 54.0 |

VGLM = Vordergliedmasse, # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Vordergliedmassen. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Kräfte an Aussen- und Innenklaue waren signifikant unterschiedlich. Via Berechnung aus den Kräfte-Mittelwerten resultierte eine prozentuale Kräfteverteilung zwischen Aussen- und Innenklaue von 29.9 % zu 70.1 %. Die grössere Kraft wurde bei allen 28 Tieren unter der Innenklaue registriert (Abb. 23).

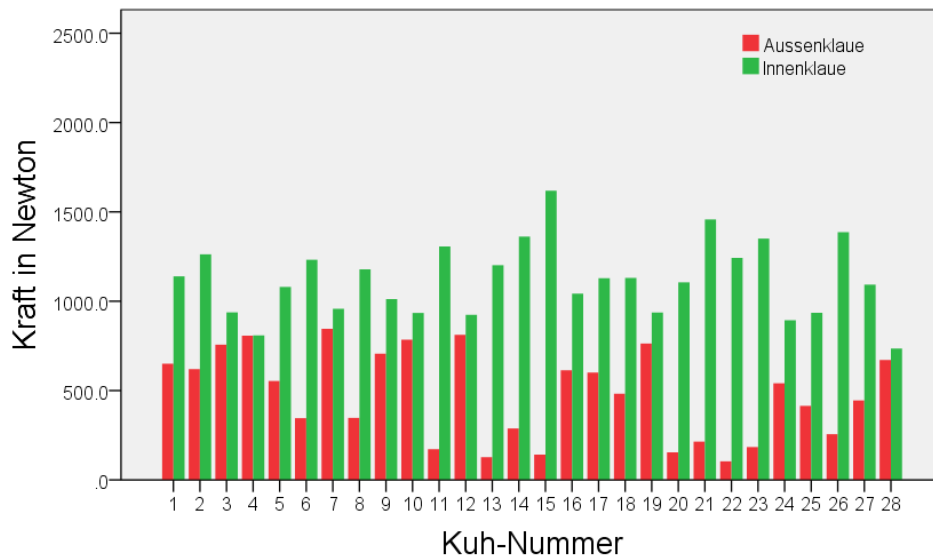


Abbildung 23: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) einer Vordergliedmasse (Werte der beiden Vordergliedmassen für jede Kuh gemittelt), Ausgangssituation.

Bei allen 28 Tieren stellte zudem die Ballenzone der Innenklaue die am stärksten belastete Klauenzone an einer Vordergliedmasse dar. An der Innenklaue fiel eine signifikant grössere Kraft auf die Ballenzone als auf die Spitzenzone: Die Kraft war dort – berechnet aus den Mittelwerten – zu 77.0 % auf die Ballenzone und zu 23.0 % auf die Spitzenzone verteilt. An der Aussenklaue unterschieden sich die Kräfte in den beiden Klauenzonen nicht signifikant: So war bei je der Hälfte der Tiere entweder die Spitzenzone stärker belastet als die Ballenzone oder umgekehrt. Die Ballenzone der Aussenklaue war bei 9 von 28 Tieren mit unter 100 N, also mit maximal 10 kg, belastet.

6.1.2.2. Flächen der Klauenabdrücke

Die beiden Klauen einer Vordergliedmasse zusammen hinterliessen im arithmetischen Mittel eine Abdruckfläche von 78.5 cm² (Tab. 2). Die Flächen der Klauenabdrücke an linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 81.4 \text{ cm}^2$, $\sigma = 21.1$; $\mu_R = 75.7 \text{ cm}^2$, $\sigma = 22.7$) waren nicht signifikant unterschiedlich.

Tabelle 2: Abdruckflächen (in cm²) und Flächenanteile (in %) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Vordergliedmasse | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | 78.5 (19.0) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| | 32.9 (13.4) * ¹ | | 45.6 (6.9) * ¹ | |
| | 41.9 | | 58.1 | |
| Anteil (%) an einer VGLM | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 16.2 (4.5) | 16.7 (10.3) * ³ | 15.7 (3.3) * ² | 29.9 (4.8) * ^{2,3} |
| | | | | $\tilde{x} = 29.2$ |
| | | | | (Min = 21.7, |
| | | | | Max = 46.5) |
| Anteil (%) an einer Klaue | 49.2 | 50.8 | 34.4 | 65.6 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 20.6 | 21.3 | 20.0 | 38.1 |

VGLM = Vordergliedmasse, * = signifikanter Unterschied zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Bei 24 von 28 Tieren besass die Innenklaue die grössere Abdruckfläche als die Aussenklaue. So fielen 41.9 % der Gesamtabdruckfläche beider Klauen einer Vordergliedmasse auf die Aussenklaue und 58.1 % auf die Innenklaue. Die Flächen der beiden Klauenabdrücke waren signifikant unterschiedlich.

Die beiden Spitzenzonen sowie die Ballenzone der Aussenklaue hinterliessen einen ungefähr gleich grossen Abdruck, wohingegen die Ballenzone der Innenklaue die grösste Abdruckfläche aufwies (signifikant grösser als die drei anderen Hauptzonen-Abdruckflächen), und zwar nicht nur bei Betrachtung der Mittelwerte über die 28 Tiere, sondern bei einer grossen Mehrheit der einzelnen Tiere, nämlich bei 26 von 28 Tieren. Die Ballenzone der Aussenklaue besass bei einigen Kühen nur eine sehr kleine Fussungsfläche (Minimum 0.5 cm²). Über alle Kühe gesehen unterschieden sich die Abdruckflächen von Spitzen- und Ballenzone innerhalb der Aussenklaue jedoch nicht signifikant.

Die Abdruckfläche der Aussenklaue zeigte generell zwischen den einzelnen Kühen grosse Unterschiede (Minimum 12.7 cm², Maximum 64.6 cm²). Zwischen ihr und der an der Aussenklaue gemessenen Kraft war eine stark positive Korrelation festzustellen (Korrelationsko-

effizient nach Spearman: $r = 0.825^{**}$). Bei verhältnismässig stärker belasteter Aussenklaue wurde ihre Abdruckfläche also grösser und bei geringerer Belastung wurde sie kleiner. Eine grössere Abdruckfläche an der Aussenklaue war wiederum mit einer kleineren Kraft an der Innenklaue korreliert (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = -0.741^{**}$).

Tabelle 3: Korrelationen zwischen jeweiliger Abdruckfläche der Vordergliedmassen und Alter, Laktationsnummer oder Körpermasse der 28 Kühe, Ausgangssituation. Korrelationskoeffizienten r nach Bravais-Pearson (Alter, Gewicht) oder Spearman (Laktationsnummer) (* signifikant auf dem Niveau 0.05).

| | Alter | Laktationsnummer | Körpermasse |
|---------------------------------------|-------------|------------------|-----------------|
| Abdruckfläche Vordergliedmasse | $r = 0.326$ | $r = 0.374$ | $r = 0.389^{*}$ |
| Abdruckfläche Aussenklaue | $r = 0.291$ | $r = 0.345$ | $r = 0.327$ |
| Abdruckfläche Innenklaue | $r = 0.333$ | $r = 0.388^{*}$ | $r = 0.435^{*}$ |

Sowohl die Klauenabdruckfläche einer Vordergliedmasse als Ganzes als auch diejenigen der beiden Klauen separat korrelierten zudem jeweils mit mittlerer Effektstärke positiv mit Alter, Laktationsnummer und Gewicht der Tiere (Tab. 3).

6.1.2.3. Mittlere Drücke

Über alle 28 Tiere gemittelt wurde an einer Vordergliedmasse ein mittlerer Druck von 217.5 kPa gemessen (Tab. 4). An der linken und rechten Vordergliedmasse ($\mu_L = 207.2$ kPa, $\sigma = 45.3$; $\mu_R = 227.7$ kPa, $\sigma = 70.3$) war dieser nicht signifikant unterschiedlich.

Tabelle 4: Mittlere Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 217.5 (50.8) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue | |
| 139.5 (46.5) ^{*1} | | 253.0 (67.1) ^{*1} | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 136.1 (44.3) | 111.4 (72.2) ^{*3} | 164.5 (61.9) ^{*2} | 295.4 (79.2) ^{*2,3} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An der Innenklaue wurde bei 27 von 28 Tieren ein grösserer und insgesamt ein signifikant grösserer mittlerer Druck registriert als an der Aussenklaue. Der arithmetische Mittelwert über die 28 Tiere des mittleren Druckes an der Innenklaue war fast doppelt so gross wie derjenige an der Aussenklaue. Über alle vier Hauptzonen der beiden Klauen einer Vordergliedmasse gesehen wurde der grösste mittlere Druck in der Ballenzone der Innenklaue registriert. Dies war bei allen 28 Tieren der Fall. Der mittlere Druck in der Ballenzone der Innenklaue war signifikant unterschiedlich zu demjenigen in der Spitzenzone der Innenklaue. Bei Betrachtung der Mittelwerte auf Klauenzonenlevel an der Aussenklaue wies die Spitzenzone einen leicht grösseren mittleren Druck auf als die Ballenzone. Dieser Unterschied war allerdings nicht statistisch signifikant.

6.1.2.4. Maximale Drücke

Der Maximaldruck an einer Vordergliedmasse schwankte erheblich und nahm Werte zwischen 496 kPa und 2640 kPa an; das arithmetische Mittel betrug 1258.0 kPa (Tab. 5). Die Werte der linken und rechten Gliedmasse ($\mu_L = 1166.7$ kPa, $\sigma = 357.5$; $\mu_R = 1349.4$ kPa, $\sigma = 527.9$) unterschieden sich nicht signifikant.

Tabelle 5: Maximale Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | |
|--|---------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1258.0 (378.0) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue | |
| 600.7 (239.4) * ¹ | | 1206.2 (371.6) * ¹ | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 492.3 (199.2) * ³ | 442.5 (298.8) | 613.5 (228.3) * ^{2,3} | 1204.9 (372.5) * ^{2,4} |
| $\tilde{x} = 368.1$ (Min = 19.4, Max = 1041.1) * ⁴ | | | |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Beim Vergleich der Mittelwerte wies die Innenklaue einen etwa doppelt so grossen, insgesamt signifikant höheren Maximaldruck auf als die Aussenklaue. Wie der mittlere Druck war auch der Maximaldruck an der Innenklaue bei 27 von 28 Tieren grösser als derjenige an der Aussenklaue.

Bei Betrachtung aller sieben Klauenzonen (das heisst der vier Hauptzonen inklusive der drei Grenzzonen) und beider Vordergliedmassen separat (56 Vordergliedmassen insgesamt also) trat der Gliedmassen-Maximaldruck meist in der Ballenzone der Innenklaue auf (Abb. 24).

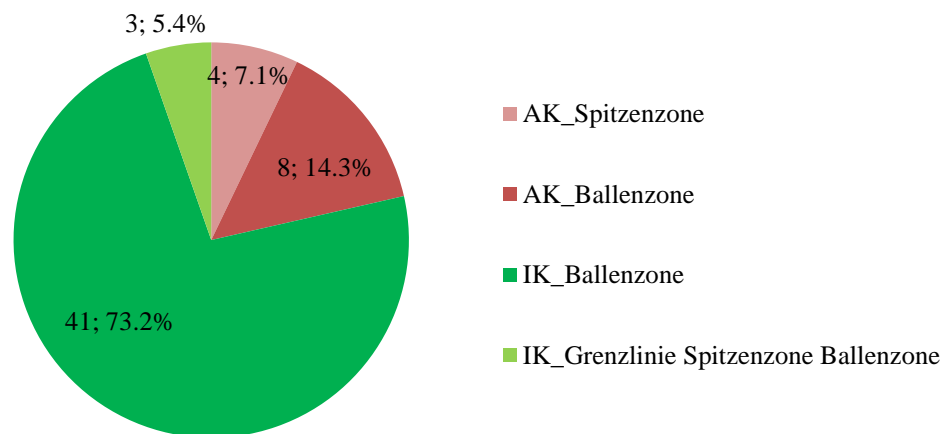


Abbildung 24: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Ausgangssituation. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken und rechten Vordergliedmasse ausgezählt (100 % = 56 Vordergliedmassen). AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

Auf die vier Hauptzonen bezogen war der höchste Maximaldruck-Mittelwert in der Ballenzone der Innenklaue zu finden. Der maximale Druck in dieser Zone war signifikant unterschiedlich zu demjenigen in der Spitzenzone der Innenklaue. Die maximalen Drücke in den beiden Zonen der Aussenklaue unterschieden sich nicht signifikant.

6.1.2.5. *Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Vordergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Vordergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand*

Der Abstand in x-Richtung (quer zur Körperlängsachse) vom Schwerpunkt einer der beiden Vordergliedmassen zum Schwerpunkt beider Vordergliedmassen betrug im Mittelwert 13.9 cm ($\sigma = 3.6$), derjenige in y-Richtung (also nach vorne oder hinten) 2.9 cm ($\sigma = 2.0$). Die links und rechts im Mittelwert respektive Median (zusätzlich angegeben bei nicht normalverteilten Daten) fast identischen Abstände in x- ($\mu_L = 13.9$ cm, $\sigma = 4.0$, $\tilde{x}_L = 14.1$ cm, Min = 8.6, Max = 25.6; $\mu_R = 13.9$ cm, $\sigma = 3.7$) sowie die eher kleinen Abstands-Mittelwerte in y-Richtung ($\mu_L = 2.9$ cm, $\sigma = 2.0$; $\mu_R = 2.9$ cm, $\sigma = 2.0$) belegen, dass die Kühe einen ausgeglichenen und recht geraden Stand eingenommen hatten (Abb. 25). So korrelierte das Verhältnis der beiden Abstands-Mittelwerte in x-Richtung stark mit der Lastverteilung auf die linke und rechte Vordergliedmasse (49.9 % zu 50.1 % versus 50.2 % zu 49.8 %; Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -1$ **).

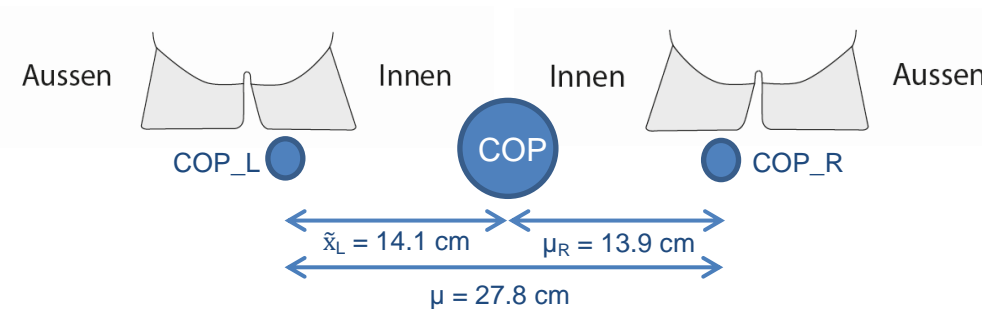


Abbildung 25: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) respektive Mediane (\tilde{x}) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Vordergliedmassen bei der Ausgangssituation.

Die Spurbreite der Vordergliedmassen betrug im Mittelwert 27.8 cm ($\sigma = 7.2$). In y-Richtung gab es durchschnittlich nur eine kleine Abweichung von 5.7 cm ($\sigma = 4.0$) von einem Stand beider Vordergliedmassen in einer Linie (was einem Vor-Rück-Beinabstand von 0 cm gleichkommen würde). Bei 11 der 28 Kühe war die linke Vordergliedmasse, bei 14 die rechte weiter kranial platziert. Bei den restlichen 3 Kühen standen die beiden Gliedmassen in y-Richtung auf ungefähr gleicher Höhe.

Mit grösser werdendem Gliedmassenabstand in x-Richtung nahm die Gewichtskraft an der Innenklaue zu (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.579^{**}$) und an der Aus-senklaue ab (Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -0.277$). Die Spurbreite korrelierte zudem leichtgradig positiv mit dem Gewicht der Tiere; das heisst, bei steigendem Körperge-wicht bestand eine Tendenz zu einem grösseren Gliedmassenabstand in x-Richtung (Korrela-tionskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.174$).

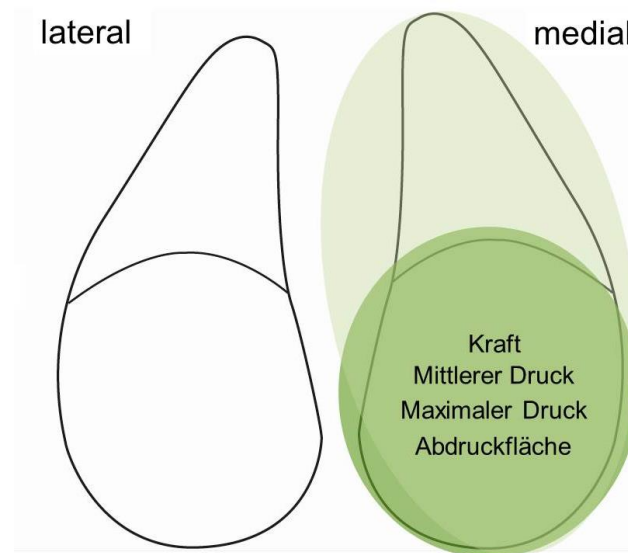


Abbildung 26: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an den Vordergliedmassen, Ausgangssituation (an einer linken Vordergliedmasse dargestellt). Im arithmetischen Mittelwert und bei einer Mehrzahl der Tiere lagen diese Parameter an der Innenklaue und in deren Ballenzone (grün).

6.1.2.6. Zusammenfassung Ausgangssituation (Vordergliedmassen)

Bei der Kraft, der Klauenabdruckfläche, dem mittleren sowie dem maximalen Druck wurden an den Vordergliedmassen bei der Ausgangssituation sowohl bei den meisten Tieren als auch bei Betrachtung der Mittelwerte die grössten Werte jeweils an der Innenklaue und in der Ballenzone der Innenklaue gefunden (Abb. 26).

6.1.3. Messwerte für die Hintergliedmassen

6.1.3.1. Gewichtskräfte

An beiden Hintergliedmassen zusammen wurde im arithmetischen Mittel eine Gewichtskraft von 2847.8 N ($\sigma = 239.9$) gemessen. Diese war – berechnet aus den beiden Kräfte-Mittelwerten ($\mu_L = 1431.4$ N, $\sigma = 174.8$; $\mu_R = 1416.4$ N, $\sigma = 185.1$) – mit 50.3 % zu 49.7 % fast gleichmässig auf die linke und rechte Gliedmasse verteilt.

Tabelle 6: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an einer Hintergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Hintergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ), Standardabweichungen (σ).

| | Hintergliedmasse | | | |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 1423.9 (120.0) | | | |
| Anteil (%) an beiden HGLM | 50.0 [#] | | | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen | 23.5 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| | 935.4 (149.0) ^{*1} | | 488.5 (160.5) ^{*1} | |
| Anteil (%) an einer HGLM | 65.7 | | 34.3 | |
| Anteil (%) an beiden HGLM | 32.8 | | 17.2 | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen | 15.5 | | 8.1 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 292.4 (84.0) ^{*2,3} | 643.0 (160.4) ^{*2,4} | 212.1 (93.5) ^{*3} | 276.4 (136.2) ^{*4} |
| Anteil (%) an einer Klaue | 31.3 | 68.7 | 43.4 | 56.6 |
| Anteil (%) an einer HGLM | 20.5 | 45.2 | 14.9 | 19.4 |

HGLM Hintergliedmasse. # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Hintergliedmassen.
 * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die an einer Hintergliedmasse registrierte Kraft betrug im Mittelwert 1423.9 N (Tab. 6).

Die Aussenklaue einer Hintergliedmasse war bei 26 von 28 Tieren die stärker belastete Klaue (Abb. 27) und wurde beim Vergleich der Mittelwerte beinahe doppelt so stark und insgesamt signifikant stärker belastet als die Innenklaue.

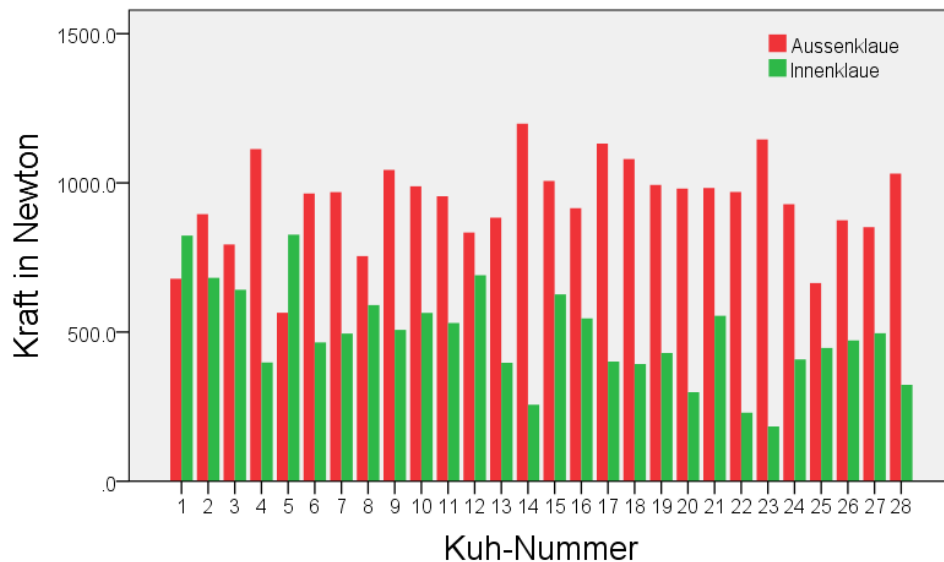


Abbildung 27: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) einer Hintergliedmasse (Werte der beiden Hintergliedmassen für jede Kuh gemittelt), Ausgangssituation.

Die Ballenzone der Aussenklaue trug beim Vergleich der Kräfte-Mittelwerte der vier Hauptzonen beider Klauen einer Hintergliedmasse den grössten Teil der Gliedmassenlast, und dies bei 25 von 28 Tieren. Innerhalb der Aussenklaue war die Ballenzone signifikant stärker belastet als die Spitzenzone; innerhalb der Innenklaue war kein signifikanter Belastungsunterschied zwischen den beiden Zonen festzustellen.

6.1.3.2. Flächen der Klauenabdrücke

Die Abdruckfläche beider Klauen einer Hintergliedmasse zusammen betrug im Mittelwert 81.0 cm^2 (Tab. 7). Die Flächenmasse für die Klauenabdrücke der linken und rechten Hintergliedmasse ($\mu_L = 81.0 \text{ cm}^2$, $\sigma = 12.2$; $\mu_R = 80.9 \text{ cm}^2$, $\sigma = 14.2$) waren über alle 28 Tiere gesehen nahezu identisch.

Tabelle 7: Abdruckflächen (in cm²) und Flächenanteile (in %) an einer Hintergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Hintergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | | | | |
|---------------------------|---|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Hintergliedmasse | | | |
| | 81.0 (11.9) | | | |
| | $\tilde{x} = 81.1$ (Min = 60.4, Max = 118.1) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| | 47.6 (6.8) * ¹ | | 33.3 (7.8) * ¹ | |
| Anteil (%) an einer HGLM | 58.8 | | 41.2 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 19.0 (3.1) * ^{2,4} | 28.6 (4.7) * ^{2,5} | 14.6 (3.5) | 18.8 (6.0) * ^{3,5} |
| | $\tilde{x} = 15.0$ (Min = 5.5, Max = 19.6) * ^{3,4} | | | |
| Anteil (%) an einer Klaue | 39.9 | 60.1 | 43.9 | 54.1 |
| Anteil (%) an einer HGLM | 23.5 | 35.3 | 18.0 | 23.2 |

HGLM = Hintergliedmasse, * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Abdruckfläche der beiden Klauen einer Hintergliedmasse war – berechnet aus den Flächen-Mittelwerten – in einem Verhältnis von 58.8 % zu 41.2 % auf die Aussen- und die Innenklaue verteilt. Aussen- und Innenklaue hatten signifikant unterschiedlich grosse Abdruckflächen, wobei bei 27 von 28 Tieren die Aussenklaue diejenige Klaue mit der grösseren Abdruckfläche war. Bei Betrachtung der einzelnen Klauenzonen fiel die grösste Abdruckfläche bei 26 von 28 Tieren der Ballenzone der Aussenklaue zu. Diese wies auch den grössten Flächen-Mittelwert der vier Hauptzonen auf. Sowohl innerhalb der Aussen- als auch innerhalb der Innenklaue war ein signifikanter Unterschied zwischen den Abdruckflächen von Spitzen- und Ballenzone festzustellen.

Wie schon an den Vordergliedmassen fiel auch an den Hintergliedmassen bei der im Mittelwert kleineren Klaue (der Innenklaue) eine erhebliche Spannweite in der Abdruckfläche auf. Und zwar mass diese bei den 28 Tieren zwischen 15.9 cm² und 52.5 cm². Auch hier konnte ein Zusammenhang zwischen Abdruckfläche und Belastung dieser Klaue festgestellt werden. So wurde mit grösserer Abdruckfläche der Innenklaue die Kraft an ihr grösser (Korrelations-

koeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.705^{**}$). Parallel dazu wurde an der Aussenklaue hingegen die Kraft kleiner ($r = -0.553^{**}$).

Tabelle 8: Korrelationen zwischen jeweiliger Abdruckfläche der Hintergliedmassen und Alter, Laktationsnummer oder Körpermasse der 28 Kühe, Ausgangssituation. Korrelationskoeffizienten r nach Bravais-Pearson (Alter, Gewicht) oder Spearman (Laktationsnummer) (** signifikant auf dem Niveau 0.01, * signifikant auf dem Niveau 0.05).

| | Alter | Laktationsnummer | Körpermasse |
|---------------------------------------|-----------------|------------------|-------------|
| Abdruckfläche Hintergliedmasse | $r = 0.241$ | $r = 0.250$ | $r = 0.356$ |
| Abdruckfläche Aussenklaue | $r = 0.399^{*}$ | $r = 0.515^{**}$ | $r = 0.260$ |
| Abdruckfläche Innenklaue | $r = 0.023$ | $r = 0.002$ | $r = 0.318$ |

Die Abdruckfläche einer Hintergliedmasse als Ganzes korrelierte leicht- bis mittelgradig positiv und diejenige der Aussenklaue separat mittelgradig bis stark positiv mit Alter, Laktationsnummer und Gewicht der Tiere. Diejenige der Innenklaue zeigte keine Korrelation mit den Faktoren Alter und Laktationszahl, allerdings eine mittelgradig positive mit dem Faktor Gewicht (Tab. 8).

6.1.3.3. Mittlere Drücke

Der mittlere Druck unter einer Hintergliedmasse betrug im Mittelwert 179.5 kPa (Tab. 9). Die mittleren Drücke unter den Klauen der linken und rechten Hintergliedmasse ($\mu_L = 179.3$ kPa, $\sigma = 27.0$; $\mu_R = 179.8$ kPa, $\sigma = 35.1$) waren nicht signifikant unterschiedlich.

Tabelle 9: Mittlere Drücke (in kPa) an einer Hintergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Hintergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Hintergliedmasse | | | |
|--|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 179.5 (24.0) | | | |
| $\tilde{x} = 184.4$ (Min = 121.6, Max = 219.2) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue | |
| 200.0 (41.8) ^{*1} | | 144.8 (37.5) ^{*1} | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 154.9 (41.1) ^{*2} | 226.9 (59.1) ^{*2,3} | 139.3 (45.3) | 138.6 (58.5) ^{*3} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Bei 24 von 28 Tieren war der grössere mittlere Druck an der Aussenklaue zu finden und bei 23 davon in deren Ballenzone. Der mittlere Druck an der Aussenklaue unterschied sich signifikant von demjenigen an der Innenklaue. In der Ballenzone der Aussenklaue wurde ein signifikant grösserer mittlerer Druck gemessen als in ihrer Spitzenzone. An der Innenklaue hingegen unterschieden sich die mittleren Drücke in den beiden Hauptzonen nicht signifikant.

6.1.3.4. Maximale Drücke

Der Maximaldruck an einer Hintergliedmasse betrug im arithmetischen Mittel 1003.8 kPa (Tab. 10). Die Maximaldrücke an linker und rechter Hintergliedmasse ($\mu_L = 1040.6$ kPa, $\sigma = 300.4$; $\mu_R = 966.9$ kPa, $\sigma = 329.6$) unterschieden sich nicht signifikant.

Tabelle 10: Maximale Drücke (in kPa) an einer Hintergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Hintergliedmassen paarweise gemittelt), Ausgangssituation. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Hintergliedmasse | | | |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1003.8 (267.6) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue | |
| 965.9 (282.0) * ¹ | | 637.4 (181.6) * ¹ | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 578.8 (172.9) * ² | 939.2 (299.5) * ^{2,3} | 507.9 (186.6) | 547.0 (209.4) * ³ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Zwischen Aussen- und Innenklaue unterschieden sich die Maximaldrücke hingegen signifikant. Der Maximaldruck an der Aussenklaue war bei 21 von 28 Tieren grösser als derjenige an der Innenklaue.

Bei Auszählung derjenigen Klauenzonen von 56 Hintergliedmassen (linke und rechte separat), in denen sich der Drucksensor mit dem Maximaldruck einer Hintergliedmasse befand, zeigte sich folgende Verteilung der Maximaldrücke auf die sieben Klauenzonen (Abb. 28):

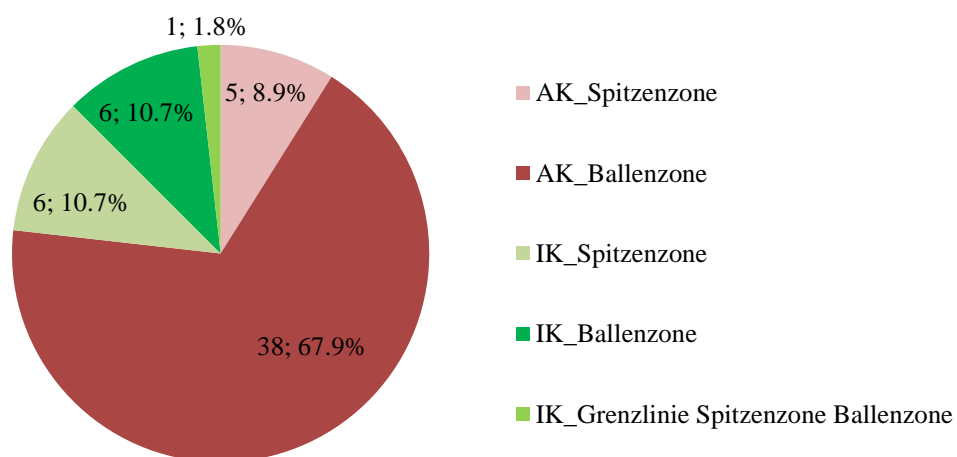


Abbildung 28: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen einer Hintergliedmasse bei der Ausgangssituation. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken und rechten Hintergliedmasse ausgezählt (100 % = 56 Hintergliedmassen). AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

Die Maximaldrücke in Spitzen- und Ballenzone waren an der Aussenklaue signifikant unterschiedlich. In der Ballenzone der Aussenklaue war über alle Klauenzonen einer Hintergliedmasse gesehen der grösste durchschnittliche Maximaldruck zu finden. An der Innenklaue gab es keinen signifikanten Unterschied im Maximaldruck zwischen den beiden Hauptzonen.

6.1.3.5. Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Hintergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Hintergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand

Der Abstand in x-Richtung vom Schwerpunkt einer der beiden Hintergliedmassen zum Schwerpunkt beider Hintergliedmassen betrug im arithmetischen Mittelwert 16.4 cm ($\sigma = 3.6$), derjenige in y-Richtung im Median 1.9 cm (Min = 0.2, Max = 7.2). Wie schon an den Vordergliedmassen bei der Ausgangssituation sprechen die im Mittelwert beinahe identischen Abstände für linke und rechte Gliedmasse in x-Richtung ($\mu_L = 16.3$ cm, $\sigma = 3.8$; $\mu_R = 16.5$ cm, $\sigma = 4.1$; Abb. 29) und die im Median kleinen Abstände für linke und rechte Gliedmasse in y-Richtung ($\tilde{x}_L = 1.9$ cm, Min = 0.2, Max = 7.0; $\tilde{x}_R = 2.0$ cm, Min = 0.3, Max = 7.4) für einen ausgeglichenen und geraden Stand der Kuh. Das Verhältnis der beiden Abstands-Mittelwerte (links und rechts) in x-Richtung korrelierte zu 100 % mit der Lastverteilung auf die linke und rechte Hintergliedmasse (49.7 % zu 50.3 % versus 50.3 % zu 49.7 %; Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -1^{**}$). Was die Abstände in y-Richtung angeht, sagen die Mediane nichts darüber aus, ob die Abweichung nach kranial oder kaudal erfolgt. Von den 28 Tieren war bei je 11 Tieren entweder die linke oder die rechte Hintergliedmasse leicht nach vorne gestellt, bei 6 Tieren standen die beiden Gliedmassen beinahe parallel zueinander.

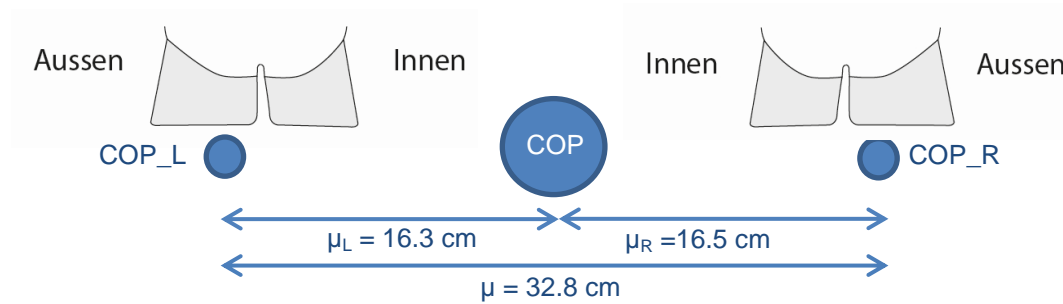


Abbildung 29: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Hintergliedmassen bei der Ausgangssituation.

Die Spurbreite der Hintergliedmassen betrug im Mittelwert 32.8 cm ($\sigma = 7.3$) (entspricht der Summe der beiden obigen Abstände) und der Vor-Rück-Beinabstand im Median 3.9 cm (Min = 0.5, Max = 14.3).

Analog zu den Vordergliedmassen zeigte sich auch an den Hintergliedmassen, dass eine Änderung der Spurbreite eine Änderung der Lastverteilung zwischen den beiden Klauen einer Hintergliedmasse zur Folge hatte: Bei grösserem Gliedmassenabstand in x-Richtung nahm auch hier die Gewichtskraft an der Innenklaue zu (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.537^{**}$) und diejenige an der Aussenklaue ab (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = -0.188$).

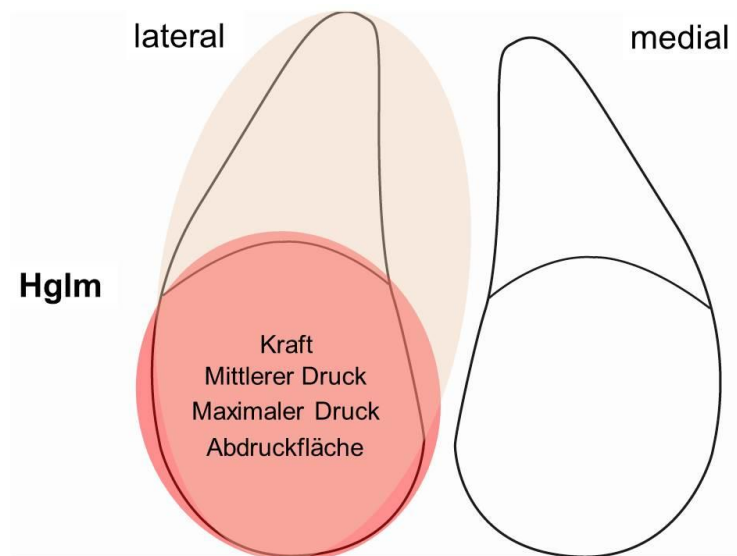


Abbildung 30: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an den Hintergliedmassen, Ausgangssituation (an einer linken Hintergliedmasse dargestellt). Im arithmetischen Mittelwert und bei einer Mehrzahl der Tiere lagen diese Parameter an der Aussenklaue und in deren Ballenzone (rot).

Die Spurbreite der Hintergliedmassen korrelierte zudem stark positiv mit dem Gewicht der Tiere; das heisst, bei steigendem Körpergewicht bestand eine grosse Tendenz zu einem grösseren Gliedmassenabstand in x-Richtung (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.474 *$).

6.1.3.6. Zusammenfassung Ausgangssituation (Hintergliedmassen)

Bei den Messungen an den Hintergliedmassen war für alle vier Haupt-Messparameter (Kraft, Klauenabdruckfläche, mittlerer und maximaler Druck) der jeweils grösste Wert an der Aussenklaue und in der Ballenzone der Aussenklaue zu finden (Abb. 30). Dies galt sowohl für die Mittelwerte als auch für die Mehrheit der Kühe.

6.1.4. Klauenmasse (Dorsalwandlänge und Dorsalwandwinkel) an den Klauen der Vorder- und Hintergliedmassen

Die Dorsalwandlängen der Aussen- und Innenklauen lagen nach Klauenpflege im Bereich von 80 mm (Tab. 11). Sie waren weder an den Vorder- noch an den Hintergliedmassen zwischen linker und rechter Gliedmasse signifikant unterschiedlich.

Tabelle 11: Dorsalwandlängen (in mm) an Aussen- und Innenklauen der linken und rechten Vorder- und Hintergliedmassen (Werte von linker und rechter Gliedmasse jeweils sowohl getrennt und als auch gemittelt aufgeführt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke VGLM | | Rechte VGLM | | Beide VGLM | | |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| AK | IK | AK | IK | AK | IK | AK und IK |
| 78.7 (4.4) | 82.4 (4.5) | 79.1 (4.4) | 82.2 (4.6) | 78.9 (4.2) * ¹ | 82.3 (4.3) * ¹ | 80.6 (4.6) * ² |
| $\tilde{x} = 80.0$ | | | | | | |
| (Min = 68.0, Max = 84.0) | | | | | | |
| Linke HGLM | | Rechte HGLM | | Beide HGLM | | |
| AK | IK | AK | IK | AK | IK | AK und IK |
| 82.0 (4.8) | 82.7 (4.5) | 82.3 (4.8) | 83.1 (5.3) | 82.2 (4.7) | 82.9 (4.7) | 82.5 (4.7) |
| | | $\tilde{x} = 82.0$ | | $\tilde{x} = 82.0$ | | $\tilde{x} = 82.0$ |
| | | (Min = 75.0, Max = 99.0) | | (Min = 75.0, Max = 99.0) | | (Min = 76.5, Max = 95.0) * ² |

VGLM = Vordergliedmasse. HGLM = Hintergliedmasse. AK = Aussenklaue. IK = Innenklaue. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Bei allen 28 Tieren wies die Innenklaue einer Vordergliedmasse (Werte von linker und rechter Gliedmasse paarweise gemittelt) eine längere Dorsalwand auf als die Aussenklaue. Der Unterschied der Dorsalwandlängen-Mittelwerte von Aussen- und Innenklaue einer Vordergliedmasse betrug 3.4 mm und war insgesamt signifikant. Die beiden Klauen einer Hintergliedmasse (Werte von linker und rechter Gliedmasse paarweise gemittelt) hatten hingegen keine signifikant unterschiedlich langen Dorsalwände. Bei der Hälfte der 28 Tiere war die Innenklaue diejenige Klaue mit der längeren Dorsalwand; bei 11 von 28 Tieren war es die Aussenklaue, und bei 3 von 28 Tieren waren beide Klauen gleich lang. Beim Vergleich der Vorder- mit den Hintergliedmassen fiel auf, dass die Klauen der Hintergliedmassen (Aussen-

und Innenklaue zusammengefasst) signifikant längere Dorsalwände aufwiesen als diejenigen der Vordergliedmassen.

Die Dorsalwandwinkel lagen bei ca. 47 °. Sie waren beim Vergleich der linken und rechten Gliedmasse – sowohl an den Vorder- als auch an den Hintergliedmassen – an den Innenklauen signifikant unterschiedlich, jedoch nicht an den Aussenklauen (Tab. 12).

Tabelle 12: Dorsalwandwinkel (in Grad) an Aussen- und Innenklauen der linken und rechten Vorder- und Hintergliedmassen (Werte von linker und rechter Gliedmasse jeweils sowohl getrennt und als auch gemittelt aufgeführt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke VGLM | | Rechte VGLM | | Beide VGLM | | |
|------------|---------------------------|-------------|--|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| AK | IK | AK | IK | AK | IK | AK und IK |
| 46.8 (3.6) | 47.5 (4.0) * ¹ | 46.8 (4.3) | 45.2 (4.3) | 46.8 (3.6) | 46.3 (3.8) | 46.6 (3.7) |
| | | | $\tilde{x} = 46.0$ | $\tilde{x} = 47.6$ | | $\tilde{x} = 47.7$ |
| | | | (Min = 33.0, Max = 52.1) * ¹ | (Min = 34.2, Max = 53.0) | | (Min = 36.3, Max = 51.1) |
| Linke HGLM | | Rechte HGLM | | Beide HGLM | | |
| AK | IK | AK | IK | AK | IK | AK und IK |
| 44.8 (3.4) | 47.4 (4.5) * ² | 43.9 (4.3) | 45.9 (4.1) * ² | 44.4 (3.4) * ³ | 46.6 (4.0) * ³ | 45.5 (3.9) |

VGLM = Vordergliedmasse. HGLM = Hintergliedmasse. AK = Aussenklaue. IK = Innenklaue. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Dorsalwandwinkel waren an einer Vordergliedmasse (Werte von linker und rechter Gliedmasse paarweise gemittelt) zwischen Aussen- und Innenklaue nicht signifikant unterschiedlich. Bei 16 der 28 Tiere war die Dorsalwand an der Aussenklaue und bei 12 an der Innenklaue steiler. Bei einer Mehrheit der Tiere, bei 22 von 28, war der Dorsalwandwinkel an einer Hintergliedmasse (Werte von linker und rechter Gliedmasse paarweise gemittelt) an der Innenklaue grösser als an der Aussenklaue. Der Unterschied im Dorsalwandwinkel zwischen Aussen- und Innenklaue war dort signifikant. Zwischen den Klauen der Vorder- und Hintergliedmassen generell (Aussen- und Innenklauen zusammengefasst) gab es keinen signifikanten Unterschied im Dorsalwandwinkel.

An den Vorder- und Hintergliedmassen zeigte sich ein mittelgradig positiver Zusammenhang zwischen der Dorsalwandlänge von Aussen- und Innenklaue (Werte der beiden Klauen paarweise gemittelt) und dem Quotienten der Kraft, des mittleren sowie des maximalen Druckes

von Ballen- zu Spitzenzone (Korrelationskoeffizienten nach Spearman für Vordergliedmassen: $r = 0.341 *$, $r = 0.346 **$ und $r = 0.316 *$; für Hintergliedmassen: $r = 0.325 *$, $r = 0.238$, $r = 0.361 **$). Dies bedeutet, dass mit längerer Dorsalwand tendenziell eine grössere Kraft und ein grösserer mittlerer sowie maximaler Druck in der Ballenzone zu finden war.

Was den Dorsalwandwinkel angeht, war an den Vordergliedmassen eine leichtgradig negative und an den Hintergliedmassen eine leicht- bis mittelgradig negative Korrelation zwischen diesem und den drei oben genannten Quotienten zu finden (Korrelationskoeffizienten nach Spearman für Vordergliedmassen: $r = -0.167$, $r = -0.167$, $r = -0.120$; für Hintergliedmassen: $r = -0.224$, $r = -0.266 *$, $r = -0.193$). Zusätzlich zur längeren Dorsalwand war also auch ein flacherer Dorsalwandwinkel mit einer stärker belasteten Ballenzone in Verbindung zu setzen.

Die Dorsalwandlängen von Aussen- und Innenklaue (Werte der beiden Klauen paarweise gemittelt) an den Vorder- und Hintergliedmassen zeigten jeweils nur schwache und meist negative Korrelationen mit dem Alter (Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson oder Spearman: $r = -0.053$, -0.132 , 0.034 respektive -0.134) oder dem Gewicht der Tiere (Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson: $r = -0.213$, -0.176 , -0.038 respektive -0.062).

An den Klauen der Vordergliedmassen korrelierten die Klauenabdruckflächen mittelgradig bis stark negativ mit den Dorsalwandlängen (Korrelationskoeffizienten r nach Bravais-Pearson zwischen -0.356 und -0.448). An den Hintergliedmassen waren ebenfalls schwache bis mittelgradig negative Korrelationen zwischen den Dorsalwandlängen und den Klauenabdruckflächen festzustellen (Korrelationskoeffizienten r nach Bravais-Pearson oder Spearman zwischen -0.063 und -0.304).

6.2. Messsituation «Holzplättchen an den Aussenklauen beider Vordergliedmassen»

6.2.1. Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen

Von den 28 Kühen, an deren Aussenklauen der Vordergliedmassen Holzplättchen (Messsituation Aussenklaue+H) angebracht waren, wurden bei allen die Vordergliedmassen und bei 15 davon zusätzlich auch die Hintergliedmassen gemessen. Bei letzteren konnte folglich aus den Mittelwerten der Gewichtskräfte an den Vorder- (bei 15 Kühen $\mu = 3068.7 \text{ N}$, $\sigma = 303.5$) und Hintergliedmassen (bei 15 Kühen $\mu = 2711.3 \text{ N}$, $\sigma = 294.5$), welche signifikant unterschiedlich waren, die prozentuale Verteilung der Kräfte auf die beiden Gliedmassenpaare bestimmt werden. Diese betrug 53.1 % für die Vorder- und 46.9 % für die Hintergliedmassen.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Gewichtskräfte an Vorder- und Hintergliedmassen bei der Messsituation Aussenklaue+H unterschieden sich nicht signifikant von denjenigen bei der Ausgangssituation.

6.2.2. Messwerte für die Vordergliedmassen

6.2.2.1. Gewichtskräfte

Die Gewichtskraft der Vordergliedmassen ($\mu = 3162.4 \text{ N}$, $\sigma = 311.1$) war mit 49.0 % zu 51.0 % – berechnet aus den Kräfte-Mittelwerten der beiden Gliedmassen ($\mu_L = 1550.5 \text{ N}$, $\sigma = 162.5$; $\mu_R = 1611.9 \text{ N}$, $\sigma = 243.7$) – fast gleichmässig auf die linke und rechte Vordergliedmasse verteilt. Auf eine Vordergliedmasse fiel dementsprechend eine Gewichtskraft von im Mittelwert 1581.2 N (Tab. 13).

Tabelle 13: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Aussenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| | Vordergliedmasse | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | 1581.2 (155.6) | | | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 50.0 [#] | | | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen) | 27.4 | | | |
| | Aussenklaue (Holzplättchen) | | Innenklaue | |
| | 797.3 (324.8) | | 783.9 (307.6) | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 50.4 | | 49.6 | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 25.2 | | 24.8 | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen) | 13.8 | | 13.6 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 306.5 (141.7) ^{*1,3} | 490.8 (258.2) ^{*1} | 196.5 (82.7) ^{*2,3} | 587.5 (279.2) ^{*2} |
| Anteil (%) an einer Klaue | 38.4 | 61.6 | 25.1 | 74.9 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 19.4 | 31.0 | 12.4 | 37.2 |

VGLM = Vordergliedmasse. # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Vordergliedmassen. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die aus deren Mittelwerten berechnete prozentuale Verteilung der Gliedmassenlast auf die beiden Klauen zeigte eine ausgeglichene Situation mit 50.4 % der Gliedmassenlast auf der linken und 49.6 % auf der rechten Vordergliedmasse. Die Gewichtskräfte an der Aussenklaue mit dem Holzplättchen (Aussenklaue+H) und an der Innenklaue unterschieden sich nicht signifikant. Über die 28 Tiere gesehen war das Verhältnis der Gewichtskräfte an den beiden Klauen jedoch deutlich unterschiedlich. So war bei 13 von 28 Tieren die Aussenklaue+H und bei 15 von 28 Tieren die Innenklaue stärker belastet (Abb. 31).

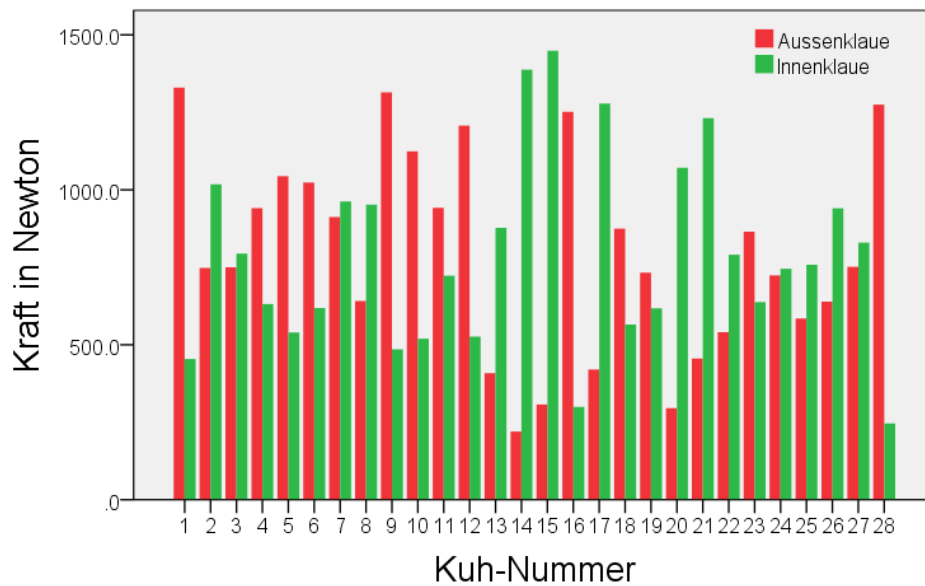


Abbildung 31: Gewichtskräfte (in N) an Aussenklaue+H (rot) und Innenklaue (grün) einer Vordergliedmasse (Werte der beiden Vordergliedmassen für jede Kuh gemittelt), Messsituation Aussenklaue+H.

Die innerhalb einer Vordergliedmasse beim Vergleich der Mittelwerte am stärksten belastete Klauenzone war – trotz des Plättchens auf der Aussenklaue – die Ballenzone der Innenklaue. Sowohl innerhalb der Aussenklaue+H als auch innerhalb der Innenklaue war die Gewichtskraft jeweils in der Ballenzone signifikant höher als in der Spitzenzone. Der Unterschied zwischen den Kräften von Spitzen- und Ballenzone war an der Innenklaue grösser als an der Aussenklaue.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Gewichtskraft an einer Vordergliedmasse als Ganzes unterschied sich zwischen der Ausgangs- und der Messsituation Aussenklaue+H nicht signifikant (Tab. 14).

Tabelle 14: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Aussenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| A | 1599.8 (159.9) | | | |
| M | 1581.2 (155.6) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue | | |
| A | 478.6 (247.1) | | 1121.2 (206.8) * ² | |
| $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) * ¹ | | | | |
| M | 797.3 (324.8) * ¹ | | 783.9 (307.6) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) * ⁶ |
| $\tilde{x} = 201.8$ | | | | |
| $\tilde{x} = 231.3$ | | | | |
| $\tilde{x} = 243.8$ | | | | |
| (Min = 86.2, Max = 468.4) * ³ | | | | |
| (Min = 0.6, Max = 576.7) * ⁴ | | | | |
| (Min = 84.4, Max = 651.5) * ⁵ | | | | |
| M | 306.5 (141.7) * ³ | 490.8 (258.2) * ⁴ | 196.5 (82.7) * ⁵ | 587.5 (279.2) * ⁶ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Zu einer signifikanten Änderung von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H kam es hingegen auf Klauenlevel: Aus einer deutlich zu Lasten der Innenklaue unausgeglichene Verteilung der Kräfte innerhalb einer Gliedmasse entstand eine Situation, bei der das Gewicht gleichmässig auf Aussen- und Innenklaue verteilt war (Abb. 32).

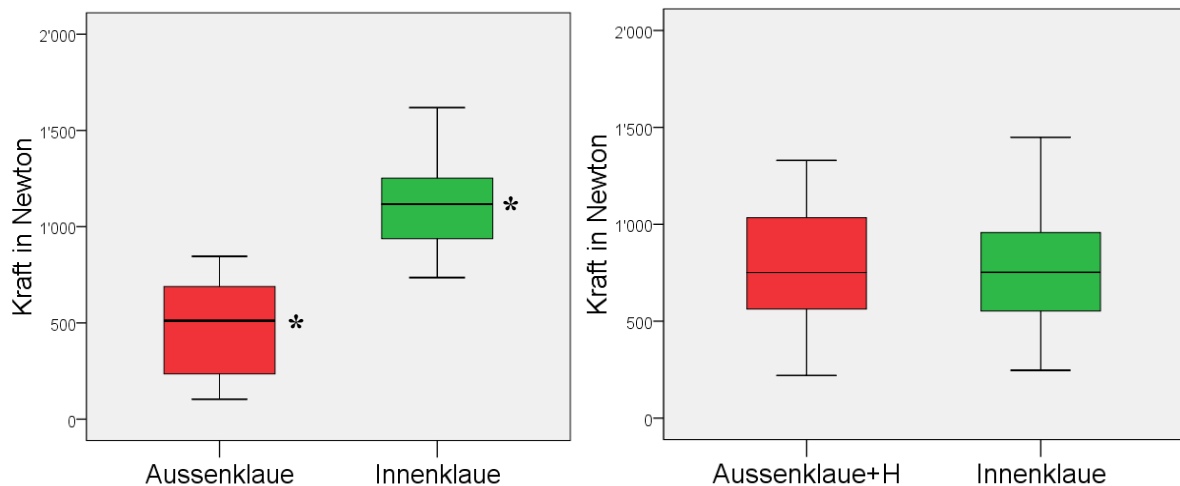


Abbildung 32: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) einer Vordergliedmasse (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt) bei der Ausgangssituation (links im Bild) und bei der Messsituation Aussenklaue+H (rechts im Bild); dargestellt als Boxplots mit Median, 25%- und 75%-Quartilen und Whiskern bei minus / plus 1.5 mal dem Interquartilsabstand. * = signifikanter Unterschied zwischen Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Vordergliedmasse.

Die Aussenklaue trug bei der Messsituation Aussenklaue+H signifikant mehr (im Median um 85.4 % mehr), die Innenklaue signifikant weniger Gewicht (im Median um 29.6 % weniger) als bei der Ausgangssituation. Die Kräftezunahme an der Aussenklaue+H war bei 24 und die Kräfteabnahme an der Innenklaue bei 25 der 28 Tiere festzustellen.

Was die Kräfte in den einzelnen Klauenzonen betrifft, waren diese allesamt zwischen Ausgangs- und Messsituation Aussenklaue+H signifikant unterschiedlich. In Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue waren von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H signifikante Kräftezunahmen zu finden (bei je 24 von 28 Tieren und im Median um 26.4 % respektive um 138.3 %). An der Innenklaue nahm die Belastung in Spitzen- und Ballenzone dagegen signifikant ab (bei 22 respektive 24 von 28 Tieren und im Median um 28.5 % respektive 35.1 %).

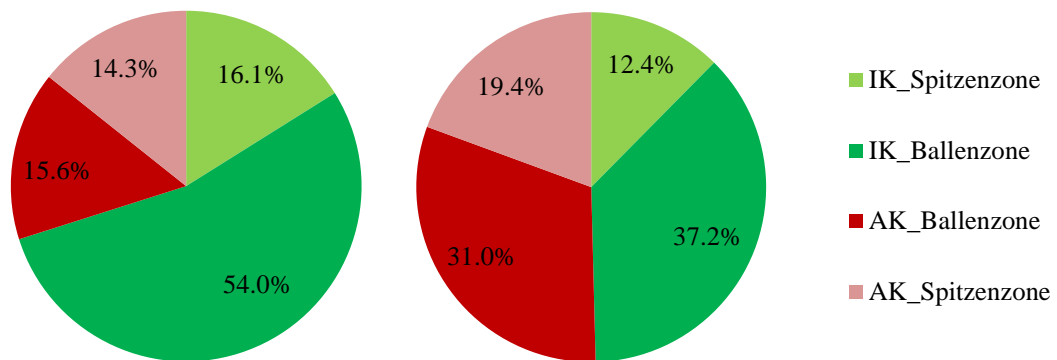


Abbildung 33: Vergleich der Kräfteverteilung (% , Mittelwerte) auf die Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Ausgangssituation (links im Bild) und der Messsituation Aussenklaue+H (rechts im Bild) (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). 100 % = Gewichtskraft an einer Vordergliedmasse. AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

Die Ballenzone der Innenklaue, im Mittelwert bei der Ausgangssituation mit mehr als der Hälfte der Gliedmassenlast belastet, trug bei der Messsituation Aussenklaue+H im Mittelwert nur noch etwas mehr als ein Drittel der Gliedmassenlast (Abb. 33). In der Ballenzone der Aussenklaue+H war dafür, wenn man den aus dem Kräfte-Mittelwert berechneten prozentualen Lastanteil (mit 100 % als Kraft an einer Gliedmasse) betrachtet, ein doppelt so grosser Lastanteil als in der Ausgangssituation zu messen.

6.2.2.2. Flächen der Klauenabdrücke

Beide Klauen einer Vordergliedmasse wiesen zusammen im Median eine Abdruckfläche von 102.9 cm^2 auf (Tab. 15). Die Flächen der Klauenabdrücke an linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 94.6 \text{ cm}^2$, $\sigma = 20.5$; $\mu_R = 100.6 \text{ cm}^2$, $\sigma = 19.8$) waren signifikant unterschiedlich. Die Werte der beiden Gliedmassen sind in der folgenden Tabelle dennoch in paarweiser gemittelter Form aufgeführt.

Tabelle 15: Abdruckflächen (in cm²) und Flächenanteile (in %) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Aussenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte μ und Standardabweichungen σ , bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Vordergliedmasse | | | |
|---------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 97.6 (18.9) | | | |
| | $\tilde{x} = 102.9$ (Min = 66.6, Max = 129.1) | | | |
| | Anteil (%) an beiden VGLM | | | |
| | 50.0 # | | | |
| | Aussenklaue (Holzplättchen) | | Innenklaue | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 56.3 (15.2) * ¹ | | 41.3 (7.1) * ¹ | |
| | 57.7 | | 42.3 | |
| Anteil (%) an einer Klaue | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 21.9 (7.4) * ^{2,4} | 34.4 (10.2) * ^{2,5} | 14.0 (3.5) * ^{3,4} | 27.3 (5.3) * ^{3,5} |
| | 38.9 | 61.1 | 33.9 | 66.1 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 22.5 | 35.2 | 14.3 | 28.0 |

VGLM = Vordergliedmasse. # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Vordergliedmassen. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Aussenklaue+H und Innenklaue wiesen signifikant unterschiedlich grosse Abdruckflächen auf. Bei 23 von 28 Tieren war die Abdruckfläche der Aussenklaue+H grösser als diejenige der Innenklaue (im Median um 38.3 % des Wertes der Innenklaue). Die Abdruckfläche der Aussenklaue+H nahm allerdings bei den 28 Tieren – wie schon bei der Ausgangssituation – auffällig unterschiedliche Werte ein, und zwar lag sie im Minimum bei 28.5 cm² und im Maximum bei 85.0 cm². An der Innenklaue war die Spannweite kleiner, aber immer noch gross (Minimum: 25.9 cm², Maximum: 53.8 cm²). Was die Klauenzonen betrifft, war sowohl innerhalb der Aussen- als auch innerhalb der Innenklaue die Abdruckfläche der Ballenzone signifikant grösser als diejenige der Spitzenzone.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Zwischen der Ausgangs- und der Messsituation Aussenklaue+H war ein signifikanter Unterschied in der Abdruckfläche beider Klauen einer Vordergliedmasse zusammen festzustellen:

Mit den Holzplättchen an den Aussenklauen wurde diese Fläche bei 26 von 28 Tieren und im Median um 24.2 % grösser (Tab. 16).

Tabelle 16: Vergleich der Klauenabdruckflächen (in cm²) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Aussenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|--|----------------------------|---------------------------|---|
| A | 78.5 (19.0) * ¹ | | | |
| M | 97.6 (18.9) | | | |
| | $\tilde{x} = 102.9$ (Min = 66.6, Max = 129.1) * ¹ | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 32.9 (13.4) * ² | | 45.6 (6.9) * ³ | |
| M | 56.3 (15.2) * ² | | 41.3 (7.1) * ³ | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 16.2 (4.5) * ⁴ | 16.7 (10.3) * ⁵ | 15.7 (3.3) * ⁶ | 29.9 (4.8) |
| | | | | $\tilde{x} = 29.2$ |
| | | | | (Min = 21.7, Max = 46.5) * ⁷ |
| M | 21.9 (7.4) * ⁴ | 34.3 (10.2) * ⁵ | 14.0 (3.5) * ⁶ | 27.3 (5.3) * ⁷ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Die Zunahme der Abdruckfläche einer Vordergliedmasse war vor allem der signifikanten Zunahme der Abdruckfläche der Aussenklaue zu verdanken: So wurde diese von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin bei allen 28 Tieren und prozentual im Median um 68.5 % grösser. An der Innenklaue trat eine signifikante Flächenabnahme ein (bei 23 von 28 Tieren und im Median um 11.9 %). Das Verhältnis der Abdruckflächen von Aussen- zu Innenklaue kehrte sich von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin um: Es änderte von 4 zu 6 (zugunsten der Innenklaue) zu 6 zu 4 (zugunsten der Aussenklaue+H).

Weiter zeigten bei der Messsituation Aussenklaue+H alle Klauenzonen eine signifikant andere Abdruckfläche als bei der Ausgangssituation. In Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue+H wurde je bei 27 von 28 Tieren eine Flächenzunahme (im Median um 29.6 % respektive 104.4 %), in den beiden Hauptzonen der Innenklaue bei je 22 von 28 Tieren eine Flächenabnahme (im Median um 8.1 % respektive 8.4 %) registriert.

6.2.2.3. Mittlere Drücke

An einer Vordergliedmasse wurde im arithmetischen Mittelwert ein mittlerer Druck von 168.0 kPa gemessen (Tab. 17). Die Werte für die linke und rechte Vordergliedmasse ($\mu_L = 171.3$ kPa, $\sigma = 39.7$; $\mu_R = 164.7$ kPa, $\sigma = 33.3$) waren nicht signifikant unterschiedlich.

Tabelle 17: Mittlere Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Aussenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 168.0 (33.0) | | | |
| Aussenklaue (Holzplättchen) | | Innenklaue | |
| 137.6 (39.5) ^{*1} | | 188.7 (75.4) ^{*1} | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 134.9 (32.4) | 133.4 (58.0) ^{*3} | 139.1 (52.5) ^{*2} | 207.3 (93.9) ^{*2,3} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Hingegen unterschieden sich die mittleren Drücke zwischen Aussenklaue+H und Innenklaue signifikant. Beim Vergleich der beiden Mittelwerte war der mittlere Druck an der Innenklaue um einen Viertel grösser als derjenige unter dem Holzplättchen an der Aussenklaue. Das Verhältnis zwischen den Drücken an Aussenklaue+H und Innenklaue war jedoch bei den 28 Tieren sehr unterschiedlich: bei 17 Tieren war der mittlere Druck an der Innenklaue grösser, bei 11 Tieren an der Aussenklaue+H.

Auf Klauenzonenlevel wurde in der Ballenzone der Innenklaue der grösste mittlere Druck innerhalb einer Vordergliedmasse registriert. In den anderen drei Hauptzonen wurden im Mittelwert beinahe identische mittlere Drücke gemessen. Der mittlere Druck in der Ballenzone der Innenklaue war somit auch signifikant unterschiedlich zu demjenigen in der Spitzenzone derselben Klaue. Die mittleren Drücke in den beiden Hauptzonen der Aussenklaue+H hingegen unterschieden sich nicht signifikant.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der mittlere Druck an einer Vordergliedmasse war zwischen Ausgangs- und Messsituation Aussenklaue+H signifikant unterschiedlich (Tab. 18), indem er bei der Messsituation Aussenklaue+H bei einer deutlichen Mehrheit der Tiere (bei 26 von 28) geringer als bei der Ausgangssituation war (Abnahme im Median um 19.1 %).

Tabelle 18: Vergleich der mittleren Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Aussenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A | 217.5 (50.8) * ¹ | | | |
| M | 168.0 (33.0) * ¹ | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 139.5 (46.5) | | 253.0 (67.1) * ² | |
| M | 137.6 (39.5) | | 188.7 (75.4) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 136.1 (44.3) | 111.4 (72.2) | 164.5 (61.9) * ³ | 295.4 (79.2) * ⁴ |
| M | 134.9 (32.6) | 133.4 (58.0) | 139.1 (52.5) * ³ | 207.3 (93.9) * ⁴ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Im Vergleich zur Ausgangssituation war der mittlere Druck an der Innenklaue bei der Messsituation Aussenklaue+H signifikant geringer (Abnahme bei 26 von 28 Tieren und im Median um 25.9 %). An der Aussenklaue nahm der mittlere Druck durch das Anbringen des Holzplättchens zwar bei einer leichten Mehrheit der Tiere (bei 16 von 28) ebenfalls ab, im Median war aber eine leichte Zunahme um 3.3 % festzustellen. Es kam an der Aussenklaue folglich zu keiner signifikanten Druckänderung zwischen den beiden Messsituationen. Die Innenklaue blieb bei der Messsituation Aussenklaue+H – trotz Druckabnahme – die Klaue mit dem grösseren mittleren Druck innerhalb einer Vordergliedmasse. Der Druckunterschied zwischen den beiden Klauen wurde allerdings von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin kleiner, weil sich die Werte der beiden Klauen annäherten.

Die Druckänderungen in Spitzen- und Ballenzone von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin waren nur an der Innenklaue signifikant. Dort wurden die mittleren Drücke

signifikant kleiner, und zwar bei 21 respektive 25 von 28 Tieren und im Median um 15.7 % respektive 27.7 %. Unter dem Holzplättchen an der Aussenklaue nahm der mittlere Druck in der Spitzenzone bei etwa der einen Hälfte der Tiere ab, bei der anderen zu. In der Ballenzone fand dort bei 21 von 28 Tieren eine Zunahme des mittleren Druckes statt (im Median um 26.9 %).

6.2.2.4. Maximale Drücke

Der Maximaldruck an einer Vordergliedmasse lag zwischen 437 kPa (Minimum) und 1702 kPa (Maximum) und im arithmetischen Mittel bei 1009.3 kPa (Tab. 19). Er unterschied sich zwischen linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 981.8$ kPa, $\sigma = 331.8$; $\mu_R = 1036.9$ kPa, $\sigma = 292.1$) nicht signifikant.

Tabelle 19: Maximale Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der linken und rechten Gliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Aussenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1009.3 (270.5) | | | |
| Aussenklaue (Holzplättchen) | | Innenklaue | |
| 623.7 (204.6) ^{*1} | | 865.2 (364.4) ^{*1} | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 489.2 (164.5) | 561.1 (249.8) ^{*3} | 515.9 (205.1) ^{*2} | 824.6 (381.3) ^{*2,3} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An der Aussenklaue+H wurde im Vergleich zur Innenklaue ein signifikant geringerer Maximaldruck gemessen. So war der Maximaldruck auch bei einer Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) an der Innenklaue grösser als an der Aussenklaue+H. In der Ballenzone der Innenklaue wurde auf Klauenzonenlevel der grösste Maximaldruck-Mittelwert gemessen. Dieser Maximaldruck war signifikant unterschiedlich zum Maximaldruck in der Spitzenzone der Innenklaue. Keinen signifikanten Unterschied gab es zwischen den Maximaldrücken in Spitzen- und Ballenzone des Holzplättchens an der Aussenklaue.

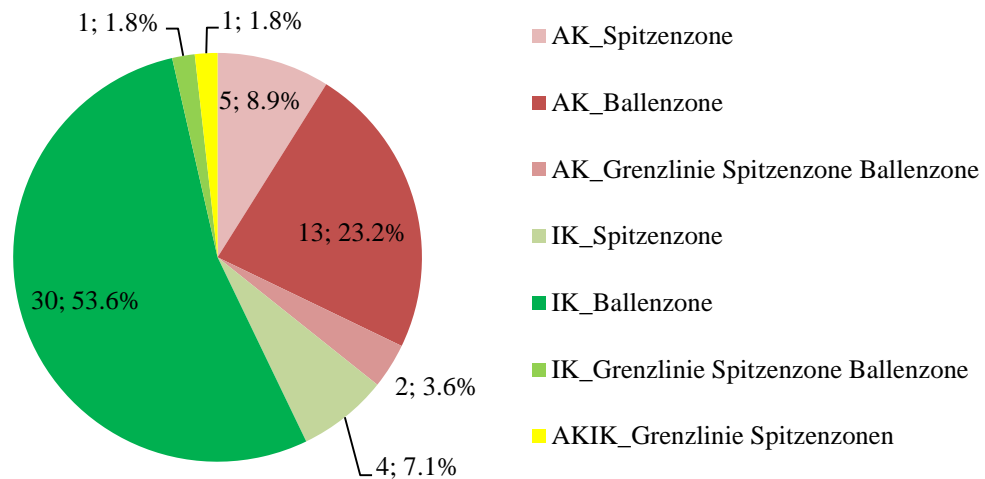


Abbildung 34: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Messsituation Aussenklaue+H. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken und rechten Vordergliedmasse ausgezählt (100 % = 56 Vordergliedmassen). AK = Aussenklaue+H, IK = Innenklaue.

Bei separater Beurteilung aller 56 Vordergliedmassen war der Maximaldruck in mehr als der Hälfte der Fälle an der Innenklaue und dort in der Ballenzone zu finden (Abb. 34).

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der Maximaldruck an einer Vordergliedmasse nahm bei der Messsituation Aussenklaue+H im Vergleich zur Ausgangssituation signifikant unterschiedliche Werte an, und zwar war er bei 23 von 28 Tieren (und im Median um 16.3 %) kleiner als bei der Ausgangssituation (Tab. 20).

Tabelle 20: Vergleich der maximalen Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Aussenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 1258.0 (450.1) * ¹ | | | |
| M | 1009.4 (311.0) * ¹ | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 600.7 (239.4) | | 1206.2 (371.6) * ² | |
| M | 623.7 (204.6) | | 865.2 (364.4) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 492.3 (199.2) | 442.5 (298.8) | 613.5 (228.3) * ⁴ | 1204.9 (372.5) * ⁵ |
| | | $\tilde{x} = 368.1$ (Min = 19.4, Max = 1041.1) * ³ | | |
| M | 489.2 (164.5) | 561.1 (249.8) * ³ | 515.9 (205.1) * ⁴ | 824.6 (381.3) * ⁵ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin gab es an der Aussenklaue keine signifikante Änderung des maximalen Druckes, an der Innenklaue hingegen schon: Bei 24 von 28 Tieren kam es durch das Anbringen der Holzplättchen zu einer Reduktion des maximalen Druckes an der Innenklaue (im Median um 32.5 %). Dadurch resultierte insgesamt eine Annäherung der Maximaldrücke der beiden Klauen einer Vordergliedmasse.

Auch innerhalb der Innenklaue, das heisst in ihren beiden Hauptzonen, war von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin eine signifikante Abnahme des maximalen Druckes festzustellen: Diese war jeweils bei einer Mehrheit der Tiere (bei 21 respektive 25 von 28) zu finden und zeigte sich in der Ballen- (Abnahme im Median um 33.4 %) etwas ausgeprägter als in der Spitzenzone (Abnahme im Median um 15.2 %). An der Aussenklaue war der maximale Druck in der Ballenzone bei den beiden Messsituationen ebenfalls signifikant unterschiedlich, in der Spitzenzone nicht: Bei 21 von 28 Tieren stieg der maximale Druck in der Ballenzone von der Ausgangs- zur Messsituation Aussenklaue+H hin an.

Bei Auszählung der Lokalisationen des Maximaldruckes an beiden Vordergliedmassen war er bei der Messsituation Aussenklaue+H weniger häufig an der Innenklaue zu finden als bei der

Ausgangssituation, allerdings immer noch bei leicht mehr als der Hälfte der 56 Gliedmassen (bei 35 versus 44 Vordergliedmassen). Zudem war der Maximaldruck vergleichsweise häufiger in der Ballenzone der Aussenklaue+H zu finden (bei 13 versus 8 Vordergliedmassen) und insgesamt über mehr verschiedene Klauenzonen verteilt.

6.2.2.5. *Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Vordergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Vordergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand*

Im arithmetischen Mittel war der Schwerpunkt einer Vordergliedmasse in x-Richtung 14.4 cm ($\sigma = 2.3$) und in y-Richtung 2.0 cm ($\sigma = 1.6$) vom Schwerpunkt beider Vordergliedmassen entfernt. Für die Abstände in beide Richtungen gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen linker und rechter Gliedmasse. Die beinahe identischen Abstände links und rechts in x-Richtung ($\mu_L = 14.6$ cm, $\sigma = 2.7$; $\mu_R = 14.1$ cm, $\sigma = 2.5$) (illustriert in Abb. 35) sowie die kleinen Abstände in y-Richtung ($\mu_L = 2.0$, $\sigma = 1.5$; $\mu_R = 2.0$, $\sigma = 1.7$) belegen wiederum, dass die Kuh einen geraden und ausgeglichenen Stand einnahm. So korrelierte das Verhältnis der beiden Abstands-Mittelwerte in x-Richtung (50.9 % zu 49.1 %) vollständig mit der beinahe ausgeglichenen prozentualen Lastverteilung auf die linke und rechte Vordergliedmasse (49.0 % zu 51.0 %; Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -1^{**}$).

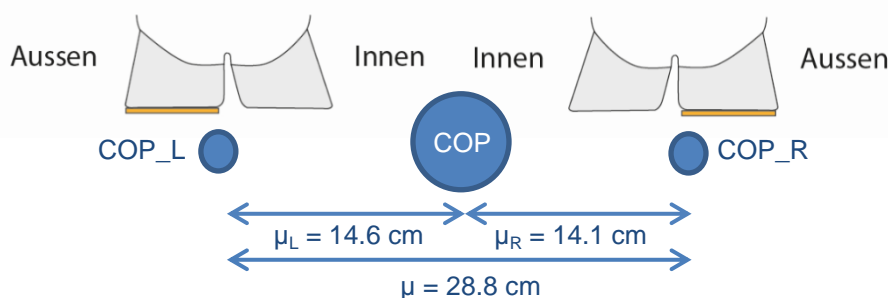


Abbildung 35: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Vordergliedmassen bei der Messsituation Aussenklaue+H.

Die Spurbreite betrug im arithmetischen Mittel 28.8 cm ($\sigma = 4.6$). In y-Richtung gab es von einem Stand beider Vordergliedmassen auf exakt gleicher Höhe eine Abweichung von durchschnittlich 4.0 cm ($\sigma = 3.2$).

Vergleich mit der Ausgangssituation

Bei der Messsituation Aussenklaue+H zeigten die Kühe keine signifikant unterschiedlichen Abstände der Gliedmassenschwerpunkte zum Gliedmassenpaar-Schwerpunkt und demnach auch keine signifikant unterschiedliche Spurbreite und keinen signifikant unterschiedlichen Vor-Rück-Beinabstand im Vergleich zur Ausgangssituation.

Wie schon bei der Ausgangssituation lag bei der Messsituation Aussenklaue+H mit zunehmender Spurbreite eine Tendenz zur Zunahme der Last an der Innenklaue und zur Abnahme der Last an der Aussenklaue+H vor. Die Korrelationen waren allerdings nur schwach (Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson: $r = 0.222$ für Last an Innenklaue, $r = -0.047$ für Last an Aussenklaue+H).

6.2.2.6. Zusammenfassung Messsituation Aussenklaue+H

Die Kräfteverteilung auf Aussenklaue+H und Innenklaue einer Vordergliedmasse war beinahe ausgeglichen (Abb. 36). Die grössere Abdruckfläche war an der Aussenklaue+H, der grössere mittlere sowie maximale Druck an der Innenklaue zu finden. Die Ballenzone der Innenklaue war die Klauenzone mit der grössten Kraft sowie dem grössten mittleren und maximalen Druck. Die Ballenzone der Aussenklaue+H machte dagegen den grössten Anteil an der Abdruckfläche beider Klauen aus.

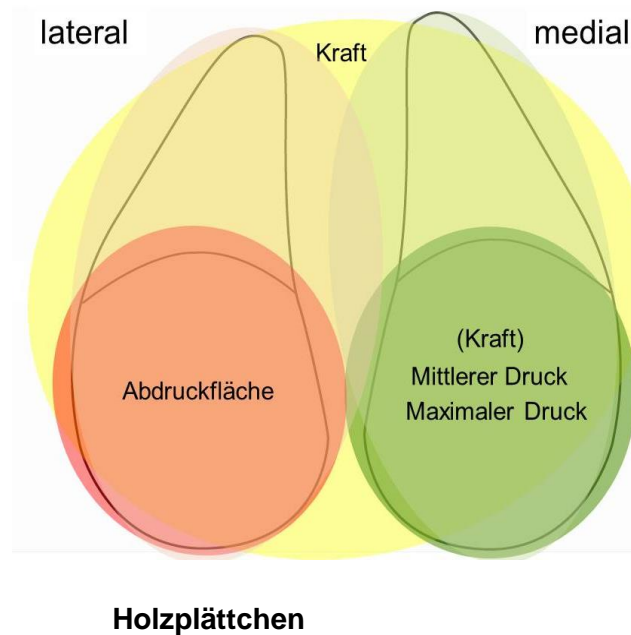


Abbildung 36: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an einer Vordergliedmasse, Messsituation Aussenklaue+H (an der linken Vordergliedmasse gezeigt). Darstellung anhand des arithmetischen Mittelwerts und der Mehrheit der Tiere: rot = Lokalisation an der Aussenklaue, grün = Lokalisation an der Innenklaue, gelb = Parameter an Aussenklaue+H und Innenklaue ungefähr gleich gross.

Im Vergleich zur Ausgangssituation blieb bei der Messsituation Aussenklaue+H die prozentuale Kräfteverteilung auf linke und rechte Vordergliedmasse beinahe identisch (siehe Anhang, Abb. 58, a). Dafür war die Aussenklaue+H signifikant stärker belastet als die Aussenklaue bei der Ausgangssituation. Zudem wies diese Klaue eine signifikant grössere Abdruckfläche auf. Sowohl der mittlere als auch der maximale Druck änderten sich dort über alle Tiere gesehen nicht signifikant. Der Maximaldruck wurde allerdings relativ häufiger an der Aussenklaue+H – und dafür relativ seltener an der Innenklaue – gemessen. An der Innenklaue wurden im Vergleich zur Ausgangssituation eine signifikant kleinere Kraft und auch eine signifikant kleinere Abdruckfläche registriert. Die beiden Druckparameter waren dort ebenfalls signifikant kleiner.

6.3. Messsituation «Holzplättchen an den Innenklauen beider Vordergliedmassen»

6.3.1. Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen

Mit den Holzplättchen an den Innenklauen beider Vordergliedmassen (Messsituation Innenklaue+H) wurde an den Hintergliedmassen von 15 Kühen eine Kraft von im arithmetischen Mittel 2695.3 N ($\sigma = 317.4$), an den Vordergliedmassen aller 28 Kühe eine von 3193.6 N ($\sigma = 279.9$) und an den Vordergliedmassen der 15 Kühe eine von 3064.0 N ($\sigma = 287.2$) gemessen. Die aus den Kräfte-Mittelwerten für 15 Kühe berechnete prozentuale Verteilung auf die Vorder- und Hintergliedmassen lag bei 53.2 % zu 46.8 %. Der Mittelwertvergleich zwischen den Gewichtskräften an Vorder- und Hintergliedmassen bei je 15 Kühen zeigte einen signifikanten Unterschied. Die an den Gliedmassenpaaren registrierten Kräfte bei der Messsituation Innenklaue+H waren nicht signifikant unterschiedlich zu denen bei der Ausgangssituation.

6.3.2. Messewerte für die Vordergliedmassen

6.3.2.1. Gewichtskräfte

Die Last, die beide Vordergliedmassen zusammen zu tragen hatten ($\mu = 3193.6$ N, $\sigma = 280.0$), wurde zu 50.9 % auf die linke und zu 49.1 % auf die rechte Schultergliedmasse verteilt (Tab. 21). So gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Kräften an der linken und rechten Vordergliedmasse ($\mu_L = 1624.1$ N, $\sigma = 245.1$; $\mu_R = 1596.5$ N, $\sigma = 223.7$). Im arithmetischen Mittel fiel auf eine Vordergliedmasse eine Kraft von 1596.8 N.

Tabelle 21: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Innenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Vordergliedmasse | | | |
|--|---|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | 1596.8 (139.9) | | | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 50.0 [#] | | | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen) | 27.7 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue (Holzplättchen) | |
| | 278.8 (158.7) ^{*1} | | 1318.0 (180.1) ^{*1} | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 17.5 | | 82.5 | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 8.7 | | 41.3 | |
| Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen) | 4.8 | | 22.9 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 179.8 (76.0) ^{*2,4} | 99.0 (125.8) | 281.7 (109.4) ^{*3,4} | 1036.2 (161.4) ^{*3,5} |
| | $\tilde{x} = 32.7$ (Min = 0.0, Max = 461.3) ^{*2,5} | | | |
| Anteil (%) an einer Klaue | 64.5 | 35.5 | 21.4 | 78.6 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 11.3 | 6.2 | 17.6 | 64.9 |

VGLM = Vordergliedmasse. # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Vordergliedmassen. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Innerhalb einer Vordergliedmasse waren die Kräfte an der Aussenklaue und an der Innenklaue mit dem Holzplättchen (Innenklaue+H) signifikant unterschiedlich gross. Und zwar trug die Aussenklaue – wiederum berechnet aus den Kräfte-Mittelwerten – 17.5 % und die Innenklaue+H 82.5 % der Gliedmassenlast. Letztere war bei allen 28 Tieren die stärker belastete Klaue (Abb. 37).

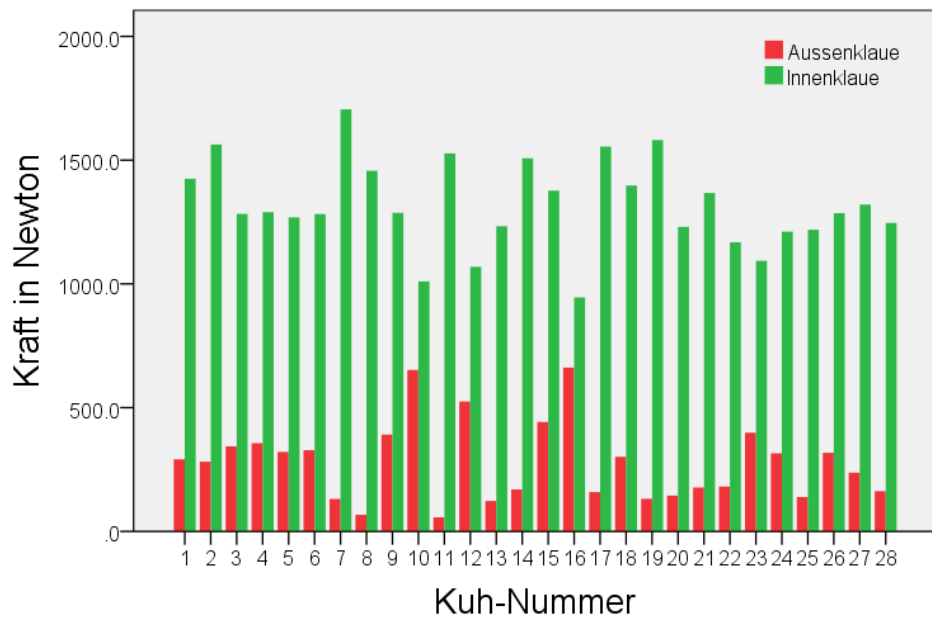


Abbildung 37: Gewichtskräfte (in N) an Aussenklaue (rot) und Innenklaue+H (grün) einer Vordergliedmasse (Werte der beiden Vordergliedmassen für jede Kuh gemittelt), Messsituation Innenklaue+H.

An der Aussenklaue war in der Spitzenzone eine signifikant grössere Kraft zu finden als in der Ballenzone. An der Innenklaue+H war die Kräfteverteilung zwischen den beiden Klauenzonen umgekehrt: Auf die Ballenzone fiel eine signifikant grössere Last als auf die Spitzenzone. Die Ballenzone der Innenklaue+H war insgesamt deutlich die am stärksten belastete Klauenzone der vier Hauptzonen.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die bei der Messsituation Innenklaue+H gemessene Gewichtskraft war nicht signifikant unterschiedlich zu derjenigen bei der Ausgangssituation (Tab. 22).

Tabelle 22: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Innenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|--|---|--|-------------------------------|
| A | 1599.8 (159.9) | | | |
| M | 1596.8 (139.9) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 478.6 (247.1) * ¹ | | 1121.2 (206.8) * ² | |
| | x̄ = 511.6 (Min = 103.6, Max = 845.8) | | | |
| M | 278.8 (158.7) * ¹ | | 1318.0 (180.1) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) * ⁶ |
| | x̄ = 201.8 | x̄ = 231.3 | x̄ = 243.8 | |
| | (Min = 86.2, Max = 468.4) * ³ | (Min = 0.6, Max = 576.7) * ⁴ | (Min = 84.4, Max = 651.5) * ⁵ | |
| M | 179.8 (76.0) * ³ | 99.0 (125.8) | 281.7 (109.4) * ⁵ | 1036.2 (161.4) * ⁶ |
| | | x̄ = 32.7 | | |
| | | (Min = 0.0, Max = 461.3) * ⁴ | | |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Im Vergleich zur Ausgangssituation wurde die Aussenklaue bei der Messsituation Innenklaue+H signifikant geringer belastet (Abnahme im Median um 41.9 %), die Innenklaue+H jedoch signifikant stärker (Zunahme im Median um 19.1 %). Die Kräfte der Aussen- und Innenklaue waren entsprechend noch stärker divergierend (Abb. 38) als bei der Ausgangssituation: So halbierte sich das Verhältnis der Kräfte-Mittelwerte von der Aussen- zur Innenklaue von leicht mehr als 2 zu 5 auf 1 zu 5. Die Kräfteabnahme an der Aussenklaue war bei 23, die Kräftezunahme an der Innenklaue+H bei 22 der 28 Tiere zu finden.

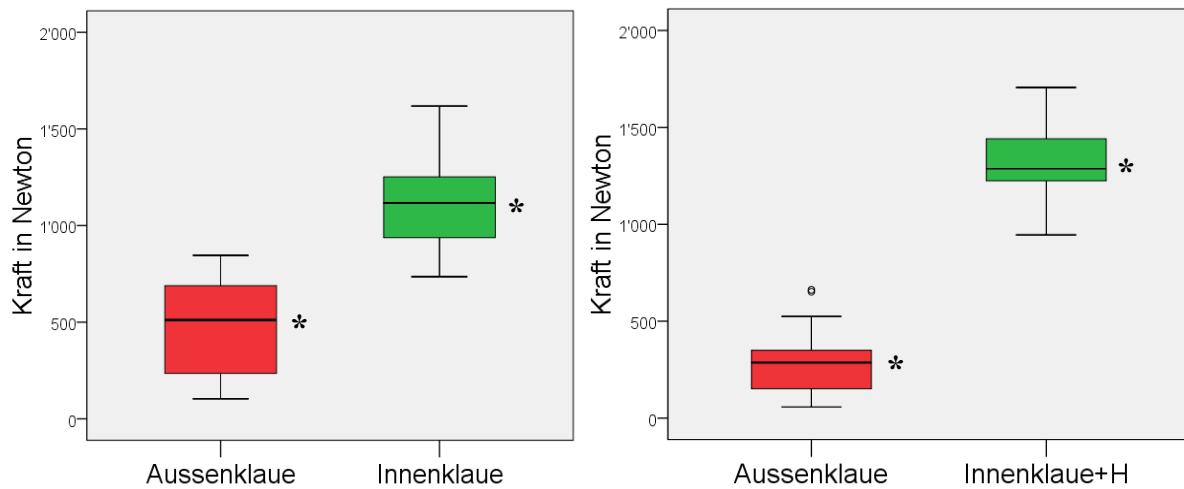


Abbildung 38: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) einer Vordergliedmasse (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt) bei der Ausgangssituation (links im Bild) und bei der Messsituation Innenklaue+H (rechts im Bild); dargestellt als Boxplots mit Median, 25%- und 75%-Quartilen und Whiskern bei minus / plus 1.5 mal dem Interquartilsabstand. * = signifikanter Unterschied zwischen Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Vordergliedmasse.

Auf Klauenzonenlevel waren die Gewichtskräfte in allen vier Klauenzonen zwischen der Ausgangs- und der Messsituation Innenklaue+H signifikant unterschiedlich. In der Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue kam es bei einer Mehrheit der Tiere (bei 21 respektive 22 von 28) zu einer Abnahme der Kraft, welche in der Ballenzone noch viel stärker ausfiel (Abnahme im Median um 74.8 %) als in der Spitzenzone (Abnahme im Median um 19.1 %).

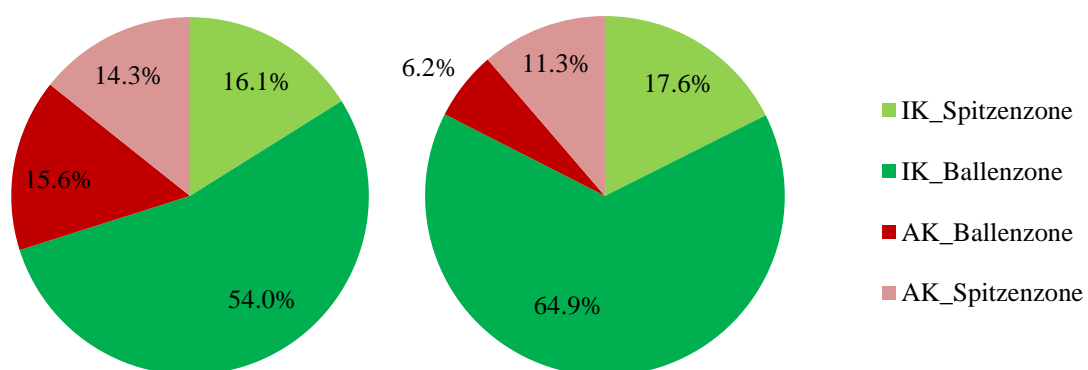


Abbildung 39: Vergleich der Kräfteverteilung (% , Mittelwerte) auf die Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Ausgangssituation (links im Bild) und der Messsituation Innenklaue+H (rechts im Bild) (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). 100 % = Gewichtskraft an einer Vordergliedmasse. AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

An der Innenklaue+H hingegen wurde ebenfalls bei einer Mehrheit der Tiere (bei 21 respektive 24 von 28) in beiden Hauptzonen eine Kräftezunahme (im Median um 10.8 % respektive 20.3 %) registriert. Die Ballenzone blieb deutlich stärker belastet als die Spitzenzone. Von der Ausgangs- zur Messsituation Innenklaue+H hin fand insgesamt demnach vor allem eine Kräfteverschiebung von der Ballenzone der Aussenklaue zur Ballenzone der Innenklaue+H hin statt (zur Veranschaulichung siehe Abb. 39).

6.3.2.2. Flächen der Klauenabdrücke

Die Fläche der Klauenabdrücke beider Vordergliedmassen zusammen betrug im arithmetischen Mittel 80.2 cm^2 (Tab. 23). Sie war auf eine Kommastelle gerundet an linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 80.2 \text{ cm}^2$, $\sigma = 22.6$; $\mu_R = 80.2 \text{ cm}^2$, $\sigma = 19.8$) genau gleich gross.

Tabelle 23: Abdruckflächen (cm^2) und Flächenanteile (in %) an einer Vordergliedmasse, deren Klauen und Klauenzonen (Werte der beiden Vordergliedmassen paarweise gemittelt). Messsituation Innenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| | Vordergliedmasse | | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 80.2 (19.5) | | | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 50.0 # | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue (Holzplättchen) | |
| | 22.8 (12.0) * ¹ | | 57.4 (10.4) * ¹ | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 28.4 | | 71.6 | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| | 13.6 (3.7) * ^{2,4} | 9.2 (9.6) * ^{2,5} | 19.0 (5.1) * ^{3,4} | 38.5 (6.2) * ^{3,5} |
| Anteil (%) an einer Klaue | 59.6 | 40.4 | 33.0 | 67.0 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 16.9 | 11.4 | 23.7 | 48.0 |

VGLM = Vordergliedmasse. # = 50.0 % kommt zustande durch paarweise Mittelung der beiden Vordergliedmassen. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Innenklaue+H wies im Vergleich mit der Aussenklaue eine signifikant grössere Abdruckfläche auf. Diese war bei allen 28 Tieren grösser als diejenige der Aussenklaue. Aber wie bei der Ausgangssituation und bei der Messsituation Aussenklaue+H waren auch hier über die 28 Tiere deutliche Unterschiede bei den Abdruckflächen festzustellen: Die Abdruckfläche der

Aussenklaue betrug zwischen 8.3 cm^2 und 55.6 cm^2 , diejenige der Innenklaue+H zwischen 41.2 cm^2 und 74.0 cm^2 .

Was die Klauenzonen betrifft, war an der Innenklaue+H der Abdruck der Ballenzone signifikant unterschiedlich zu jenem der Spitzenzone; beim Vergleich der entsprechenden Mittelwerte war ersterer beinahe doppelt so gross wie letzterer. An der Aussenklaue waren die Abdruckflächen beider Hauptzonen ebenfalls signifikant unterschiedlich, allerdings wies dort die Spitzenzone eine grössere Fläche auf als die Ballenzone.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Abdruckflächen der Aussen- und Innenklaue unterschieden sich bei der Messsituation Innenklaue+H noch deutlicher voneinander als bei der Ausgangssituation: An der Innenklaue wurde die Abdruckfläche durch das Anbringen eines Holzplättchens signifikant grösser (bei 27 von 28 Tieren und im Median um 23.9 %) (Tab. 24). An der Aussenklaue fand währenddessen eine signifikante Flächenabnahme von der Ausgangs- zur Messsituation Innenklaue+H hin statt (bei 22 von 28 Tieren und im Median um 35.6 %).

Tabelle 24: Vergleich der Klauenabdruckflächen (in cm²) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Innenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| A | 78.5 (19.0) | | | |
| M | 80.2 (19.5) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 32.9 (13.4) * ¹ | | 45.6 (6.9) * ² | |
| M | 22.8 (12.0) * ¹ | | 57.4 (10.4) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 16.2 (4.5) * ³ | 16.7 (10.3) * ⁴ | 15.7 (3.3) * ⁵ | 29.9 (4.8) |
| | | | | $\tilde{x} = 29.2$ (Min = 21.7, Max = 46.5) * ⁶ |
| M | 13.6 (3.7) * ³ | 9.2 (9.6) * ⁴ | 19.0 (5.1) * ⁵ | 38.5 (6.2) * ⁶ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Nicht signifikant unterschieden sich allerdings die Abdruckflächen beider Klauen einer Vordergliedmasse zusammen zwischen der Ausgangs- und der Messsituation Innenklaue+H. Bei einer kleinen Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) wurde diese Abdruckfläche aber durch das Anbringen des Holzplättchens leicht grösser (im Median um 3.3 %).

In allen vier Hauptzonen gab es signifikante Unterschiede in den Abdruckflächen zwischen der Ausgangs- und der Messsituation Innenklaue+H. Innerhalb der Innenklaue+H fand in der Spitzenzone bei fast allen (23 von 28 Tieren) respektive in der Ballenzone bei allen 28 Tieren eine Flächenzunahme statt (im Median um 16.9 % respektive 26.4 %). Die beiden Hauptzonen der Aussenklaue wiesen bei der Messsituation Innenklaue+H bei einer Mehrheit der Tiere (bei 22 respektive 20 von 28) eine kleinere Abdruckfläche auf als bei der Ausgangssituation. In der dortigen Ballenzone verringerte sich die Abdruckfläche sogar im Median um mehr als die Hälfte (um minus 58.2 %).

6.3.2.3. Mittlere Drücke

Im arithmetischen Mittel betrug der mittlere Druck an einer Vordergliedmasse 211.4 kPa ($\sigma = 0.8$). Er wies zwischen linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 216.7$ kPa, $\sigma = 63.0$; $\mu_R = 206.1$ kPa, $\sigma = 53.7$) keinen signifikanten Unterschied auf (Tab. 25).

Tabelle 25: Mittlere Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der linken und rechten Gliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Innenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 211.4 (50.8) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue (Holzplättchen) | |
| 120.7 (38.5) ^{*1} | | 238.5 (57.7) ^{*1} | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 126.7 (35.5) ^{*2,4} | 57.9 (44.3) ^{*2,5} | 153.9 (53.3) ^{*3,4} | 276.9 (65.5) ^{*3,5} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Zwischen der Aussenklaue und der Innenklaue+H einer Vordergliedmasse bestand ein signifikanter Unterschied im mittleren Druck. An der Aussenklaue war beim Vergleich der Mittelwerte ein halb so grosser mittlerer Druck zu finden wie unter dem Holzplättchen an der Innenklaue. Die Innenklaue+H wies bei 27 von 28 Tieren den grösseren mittleren Druck auf als die Aussenklaue.

Der grösste mittlere Druck auf Klauenzonenlevel war unter der Ballenzone des Holzplättchens an der Innenklaue zu finden. Dieser war signifikant grösser als der mittlere Druck unter der zugehörigen Spitzenzone. Auch zwischen Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue gab es einen signifikanten Unterschied im mittleren Druck, wobei hier beide Druck-Werte deutlich kleiner waren als diejenigen an der Innenklaue+H (signifikante Unterschiede zwischen den kontralateralen Spitzen- und den kontralateralen Ballenzonen).

Vergleich mit der Ausgangssituation

Im Vergleich zur Ausgangssituation änderte sich der mittlere Druck an einer Vordergliedmasse durch das Anbringen von Holzplättchen an die Innenklauen nicht signifikant (Tab. 26). Aber bei einer knappen Mehrheit der Tiere (bei 16 von 28) nahm der mittlere Druck von der Ausgangs- zur Messsituation Innenklaue+H hin ab (im Median um 5.4 %).

Tabelle 26: Vergleich der mittleren Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Innenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | | |
|------------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| A | 217.5 (50.8) | | | |
| M | 211.4 (50.8) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 139.5 (46.5) | | 253.0 (67.1) | |
| M | 120.7 (38.5) | | 238.5 (57.7) | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 136.1 (44.3) | 111.4 (72.2) * ¹ | 164.5 (61.9) | 295.4 (79.2) |
| M | 126.7 (35.5) | 57.9 (44.3) * ¹ | 153.9 (53.3) | 276.9 (65.5) |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Sowohl an der Aussen- als auch an der Innenklaue änderte sich der mittlere Druck von der Ausgangs- zur Messsituation Innenklaue+H hin zwar nicht signifikant, aber bei jeweils einer Mehrheit der Tiere (bei 21 respektive 16 von 28) fand eine Druckabnahme statt (im Median um 12.0 % respektive 3.7 %). Die Druckverhältnisse zwischen den beiden Klauen einer Vordergliedmasse präsentierten sich bei den beiden Messsituationen folglich beinahe identisch.

In der Ballenzone der Aussenklaue fand von der Ausgangs- zur Messsituation Innenklaue+H hin eine signifikante Druckabnahme statt. Wiederum bei 21 von 28 Tieren reduzierte sich der mittlere Druck in dieser Zone, im Median sogar fast auf die Hälfte (um minus 47.7 %). In den anderen drei Hauptzonen veränderte sich der mittlere Druck nicht signifikant; es kam jedoch stets bei einer Mehrheit der Tiere (bei 16 bis 18 von 28) zu einer leichten Druckabnahme (im Median um 3.7 % bis 8.0 %).

6.3.2.4. Maximale Drücke

Im arithmetischen Mittel wurde an einer Vordergliedmasse ein maximaler Druck von 1097.4 kPa registriert (Tab. 27). Zwischen den Maximaldrücken an linker und rechter Vordergliedmasse ($\mu_L = 1092.0$ kPa, $\sigma = 294.2$; $\mu_R = 1102.7$ kPa, $\sigma = 217.2$) gab es keinen signifikanten Unterschied.

Tabelle 27: Maximale Drücke (in kPa) an einer Vordergliedmasse sowie an deren Klauen und Klauenzonen (Werte der linken und rechten Gliedmassen paarweise gemittelt), Messsituation Innenklaue+H. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| Vordergliedmasse | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1097.4 (229.0) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue (Holzplättchen) | |
| 469.9 (194.1) * ¹ | | 1073.0 (226.0) * ¹ | |
| Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| 448.6 (189.9) * ^{2,4} | 222.4 (159.7) * ^{2,5} | 656.2 (230.2) * ^{3,4} | 1068.2 (230.6) * ^{3,5} |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Unter dem Holzplättchen an der Innenklaue wurde bei allen 28 Tieren ein grösserer und insgesamt ein signifikant grösserer maximaler Druck gemessen als an der Aussenklaue. Innerhalb der beiden Klauen wiesen an der Innenklaue+H die Ballenzone und an der Aussenklaue die Spitzenzone den signifikant grösseren Maximaldruck auf.

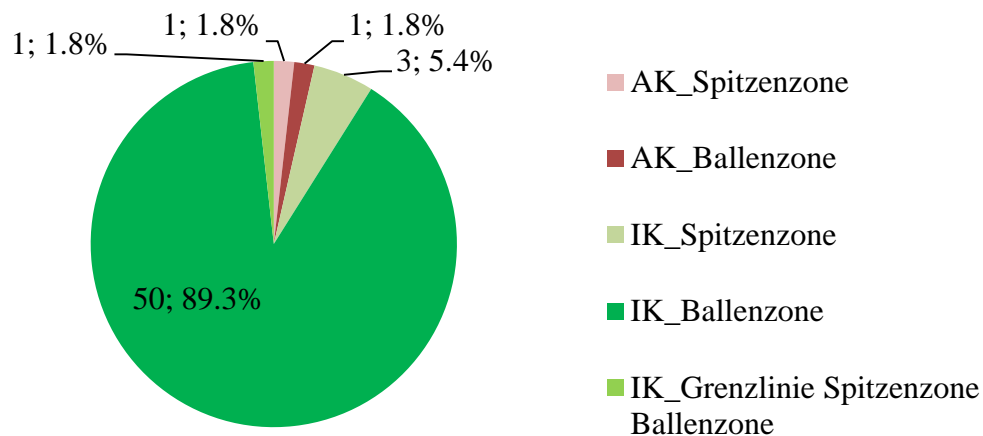


Abbildung 40: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Messsituation Innenklaue+H. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken und rechten Vordergliedmasse ausgezählt (100 % = 56 Vordergliedmassen). AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue+H).

Die Maximaldrücke einer Vordergliedmasse waren bei der Messsituation Innenklaue+H zu 96.4 % an den Innenklaue+H und zu 89.3 % in deren Ballenzonen lokalisiert (Abb. 40).

Vergleich mit der Ausgangssituation

Bei 21 der 28 Kühe war der Maximaldruck an einer Vordergliedmasse bei der Messsituation Innenklaue+H kleiner als bei der Ausgangssituation. Im Median handelte es sich dabei um eine Abnahme um 9.4 %, welche beim Mittelwertvergleich signifikant war (Tab. 28).

An beiden Einzelklauen einer Vordergliedmasse kam es im Vergleich zur Ausgangssituation zu einer signifikanten Reduktion des maximalen Druckes durch das Anbringen der Holzplättchen an die Innenklauen. An der Aussenklaue war der Unterschied zwischen den beiden Messsituationen ausgeprägter als an der Innenklaue+H (Abnahme des Maximaldruckes im Median um 23.6 % versus 8.5 %), trat dort allerdings bei etwas weniger Tieren auf als an der Innenklaue+H (bei 18 respektive 20 von 28). Innerhalb beider Klauen war jeweils in der Ballenzone eine signifikante Änderung des Maximaldruckes von der Ausgangs- zur Messsituation mit Holzplättchen hin festzustellen, und zwar war der Maximaldruck bei jeweils einer Mehrheit der Tiere (bei 21 respektive 20 von 28) abnehmend. In den Spitzenzonen von Aus-

sen- und Innenklaue veränderte sich der Maximaldruck zwischen den beiden Messsituationen nicht signifikant.

Tabelle 28: Vergleich der maximalen Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M Innenklaue+H (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen jeweils paarweise gemittelt). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Vordergliedmassen | | | | |
|-------------------|---|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 1258.0 (450.1) | | | |
| M | 1097.4 (229.0) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | |
| A | 600.7 (239.4) * ¹ | | 1206.2 (371.6) * ² | |
| M | 469.9 (194.1) * ¹ | | 1073.0 (226.0) * ² | |
| | Spitzenzone | Ballenzone | Spitzenzone | Ballenzone |
| A | 492.3 (199.2) | 442.5 (298.8) | 613.5 (228.3) | 1204.9 (372.5) * ⁴ |
| | $\tilde{x} = 368.1$ (Min = 19.4, Max = 1041.1) * ³ | | | |
| M | 448.6 (189.9) | 222.4 (159.7) * ³ | 656.2 (230.2) | 1068.2 (230.6) * ⁴ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Im Vergleich zur Ausgangssituation war bei der Messsituation Innenklaue+H der Maximaldruck einer Vordergliedmasse deutlich häufiger an der Innenklaue+H (bei 54 versus 44 von 56 Vordergliedmassen) und dort in der Ballenzone (bei 50 versus 41 von 56 Vordergliedmassen) und weniger häufig an der Aussenklaue (bei 2 versus 12 von 56 Vordergliedmassen) lokalisiert.

6.3.2.5. *Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Vordergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Vordergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand*

Der Schwerpunkt einer Vordergliedmasse mit einem Holzplättchen an der Innenklaue war im arithmetischen Mittel in x-Richtung 12.4 cm ($\sigma = 2.8$) und in y-Richtung 1.9 cm ($\sigma = 1.7$) vom Schwerpunkt beider Vordergliedmassen entfernt. In beiden Achsenrichtungen waren die

Abstände vom Gliedmassenpaar-Schwerpunkt zum Schwerpunkt der linken ($\mu_{Lx} = 12.2 \text{ cm}$, $\sigma = 3.1$; $\mu_{Ly} = 1.9 \text{ cm}$, $\sigma = 1.7$) respektive rechten Vordergliedmasse ($\mu_{Rx} = 12.6 \text{ cm}$, $\sigma = 3.2$, $\tilde{x}_{Rx} = 11.8 \text{ cm}$, $\text{Min} = 8.5$, $\text{Max} = 20.9$; $\mu_{Ry} = 1.9 \text{ cm}$, $\sigma = 1.7$) jeweils nicht signifikant unterschiedlich (Abb. 41).

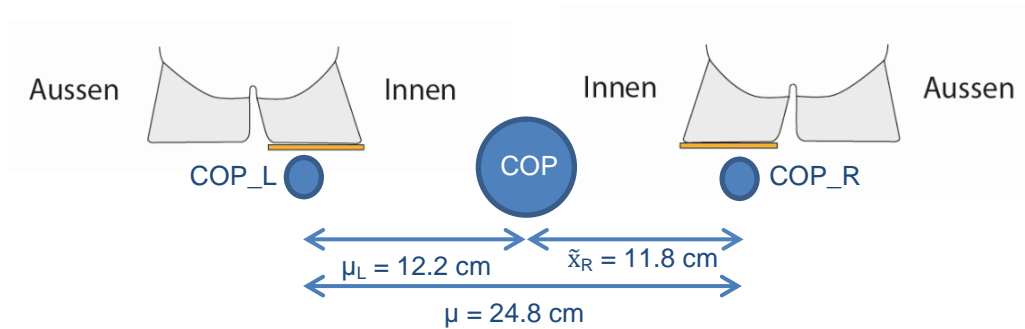


Abbildung 41: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) respektive Mediane (\tilde{x}) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Vordergliedmassen bei der Messsituation Innenklaue+H.

Das Verhältnis der beiden Abstands-Mittelwerte in x-Richtung (49.2 % zu 50.8 %) korrelierte auch bei dieser Messsituation zu 100 % negativ mit der Lastverteilung auf die linke und rechte Gliedmasse (50.8 % zu 49.2 %; Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -1 **$). Im Mittelwert betrug die Spurbreite der Vordergliedmassen 24.8 cm ($\sigma = 5.7$) und der Vor-Rück-Beinabstand 3.8 cm ($\sigma = 3.5$).

Vergleich mit der Ausgangssituation

Mit den Holzplättchen an den Innenklauen kam es im Vergleich zur Ausgangssituation zu einer signifikanten Verkleinerung (im Median Abnahme um 4.6 %) sowohl der Spurbreite als auch des Abstandes zwischen einem Vordergliedmassenschwerpunkt und dem Gliedmassenpaarschwerpunkt in x-Richtung. In y-Richtung unterschieden sich zwar die Mittelwerte dieser Parameter zwischen den beiden Messsituationen deutlicher (im Median Abnahme um 11.7 %), aber es war kein signifikanter Unterschied zu finden.

Wie schon bei der Ausgangssituation und bei der Messsituation Aussenklaue+H war auch bei der Messsituation Innenklaue+H ein Zusammenhang zwischen der Spurbreite und den Kräf-

ten an Aussen- und Innenklaue einer Vordergliedmasse festzustellen: So korrelierte die Spurbreite mittelgradig positiv mit der Last auf der Innenklaue+H (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.253$) und mittelgradig negativ mit der Last auf der Aussenklaue ($r = -0.299$). Das heisst, mit zunehmendem Gliedmassenabstand wurden die Innenklaue+H noch mehr und die Aussenklauen weniger belastet.

6.3.2.6. Zusammenfassung Messsituation Innenklaue+H

An der Innenklaue+H, und dort in der Ballenzone, wurden die grösste Kraft, die grösste Abdruckfläche und dennoch auch die grössten mittleren und maximalen Drücke innerhalb einer Vordergliedmasse gefunden (Abb. 42).

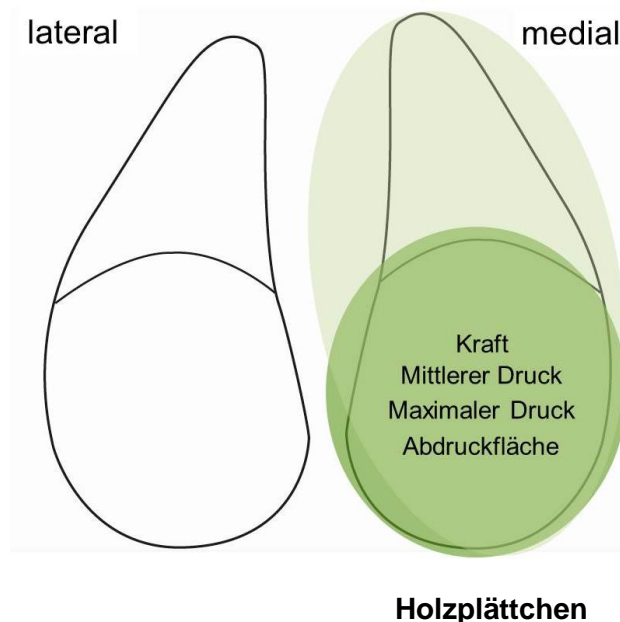


Abbildung 42: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an einer Vordergliedmasse, Messsituation Innenklaue+H (an der linken Vordergliedmasse gezeigt). Im arithmetischen Mittelwert und bei einer Mehrzahl der Tiere lagen diese Parameter an der Innenklaue+H und in deren Ballenzone (grün).

Im Vergleich zur Ausgangssituation wurde die prozentuale Lastverteilung auf die beiden Klauen einer Vordergliedmasse bei der Messsituation Innenklaue+H noch unterschiedlicher: An der Innenklaue+H fand eine signifikante Kräftezunahme und an der Aussenklaue eine signifikante Kräfteabnahme statt (siehe Anhang, Abb. 58, b). Durch das Anbringen eines Holzplättchens wurde die Abdruckfläche der Innenklaue signifikant vergrössert, der mittlere

Druck änderte sich allerdings nicht signifikant und der maximale Druck nahm signifikant ab. An der Aussenklaue nahm die Abdruckfläche signifikant ab, der mittlere und maximale Druck stiegen aber nicht an, sondern nahmen tendenziell (mittlerer Druck) oder signifikant (maximaler Druck) ebenfalls ab.

6.4. Messsituation «Kothurn an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse»

6.4.1. Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen

Wenn an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse ein Kothurn angebracht war (Messsituation linke Vordergliedmasse+K), waren die Vordergliedmassen im arithmetischen Mittel mit 3175.0 N ($\sigma = 265.5$) signifikant mehr belastet als die Hintergliedmassen mit 2811.1 N ($\sigma = 251.2$). Die aus diesen Kräfte-Mittelwerten berechnete prozentuale Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen betrug 53.0 % für die Vorder- und 47.0 % für die Hintergliedmassen.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Gewichtsverteilung auf die beiden Gliedmassenpaare war bei der Ausgangs- und bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K beinahe identisch: Sie änderte von ersterer zu letzterer lediglich um 0.1 Prozentpunkte zugunsten der Vordergliedmassen. Sowohl an den Vorder- als auch an den Hintergliedmassen war bei einer Mehrheit der Tiere (bei je 17 von 28) und im Median eine leichte Abnahme der Gewichtskraft von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin festzustellen (an den Vordergliedmassen um 0.8 %, an den Hintergliedmassen um 1.1 %). Aber nur im Falle der Hintergliedmassen waren die Kräfte bei den beiden Messsituationen signifikant unterschiedlich. So waren auch bei je 10 von 28 Tieren entweder gleichzeitig eine Kräfteabnahme an den Hintergliedmassen und eine Kräftezunahme an den Vordergliedmassen oder umgekehrt festzustellen.

6.4.2. Messwerte für die Vordergliedmassen

6.4.2.1. Gewichtskräfte

Die Last, welche auf beide Vordergliedmassen gemeinsam fiel, wurde – berechnet aus den Kräfte-Mittelwerten der einzelnen Gliedmassen – zu 52.7 % auf die rechte und zu 47.3 % auf die linke Vordergliedmasse mit dem Kothurn (linke Vordergliedmasse+K) verteilt (Tab. 29).

Tabelle 29: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an linker und rechter Vordergliedmasse, an den Aus- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich an (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke Vordergliedmasse | | | | Rechte Vordergliedmasse | | | |
|---|---|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| | 1500.5 (408.1) | | | | 1674.4 (368.7) | | | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 47.3 | | | | 52.7 | | | |
| Anteil (%) an vier Gliedmas- sen (auf 15 Kühe bezogen) | 25.0 | | | | 28.0 | | | |
| | Aussenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | 1490.0 (404.7) * ^{1,3} | | 10.6 (18.9) | | 1145.5 (302.7) * ^{2,4} | | 528.9 (326.4) * ^{2,3} | |
| | $\tilde{x} = 1.3$ (Min = 0.0, Max = 73.6) * ^{1,4} | | | | | | | |
| Anteil (%) an einer VGLM | 99.3 | | 0.7 | | 68.4 | | 31.6 | |
| Anteil (%) an beiden VGLM | 46.9 | | 0.3 | | 36.1 | | 16.7 | |
| Anteil (%) an vier Gliedmas- sen (auf 15 Kühe bezogen) | 24.9 | | 0.2 | | 19.1 | | 8.8 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 446.1 | 1043.9 | 7.9 | 2.7 | 238.1 | 907.5 | 239.4 | 289.5 |
| | (254.5) | (311.4) | (14.3) | (12.6) | (118.9) | (271.6) | (137.7) | (239.0) |
| | * ^{5,9} | * ^{5,10} | $\tilde{x} = 0.9$ | * ^{6,12} | * ^{7,11} | * ^{7,12} | * ^{8,9} | * ^{8,10} |
| | (Min = 0.0, Max = 57.5) * ^{6,11} | | | | | | | |
| Anteil (%) an einer Klaue | 29.9 | 70.1 | 74.8 | 25.2 | 20.8 | 79.2 | 45.3 | 54.7 |
| Anteil (%) an einer VGLM | 29.7 | 69.6 | 0.5 | 0.2 | 14.2 | 54.2 | 14.3 | 17.3 |

VGLM = Vordergliedmasse. SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Obwohl sich die Kräfte an linker und rechter Gliedmasse nicht signifikant unterschieden, zeigte sich eine Tendenz zur vermehrten Belastung der rechten Vordergliedmasse. So wurde nicht nur im arithmetischen Mittel, sondern auch bei der Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) an der rechten Vordergliedmasse eine grössere Kraft gemessen als an der linken Vordergliedmasse+K. Nur bei 3 Tieren herrschte eine relativ ausgeglichene Gewichtsverteilung auf die beiden Vordergliedmassen mit zwischen 47.0 % und 53.0 % der Gliedmassenpaarlast pro Gliedmasse.

Sowohl an der linken Vordergliedmasse+K als auch an der rechten Vordergliedmasse unterschieden sich die Kräfte zwischen Aussen- und Innenklaue signifikant. Die Innenklaue der linken Vordergliedmasse wurde bei 10 von 28 Kühen durch den Kothurn an der Aussenklaue vollständig entlastet (das heisst, die Kraft betrug bei diesen 0 N). Sie trug – berechnet aus den Kräfte-Mittelwerten – nur noch 0.7 % der Gliedmassenlast, wobei die Aussenklaue mit dem Kothurn (Aussenklaue+K) 99.3 % der Last auf die linke Vordergliedmasse übernahm. An der rechten Vordergliedmasse war die Innenklaue beim Vergleich der Kräfte-Mittelwerte leicht mehr als doppelt so stark belastet wie die Aussenklaue. In der folgenden Abbildung (Abb. 43) ist die unterschiedliche Verteilung der Gliedmassenlast auf Aussen- und Innenklaue bei der linken Vordergliedmasse+K und der rechten Vordergliedmasse dargestellt:

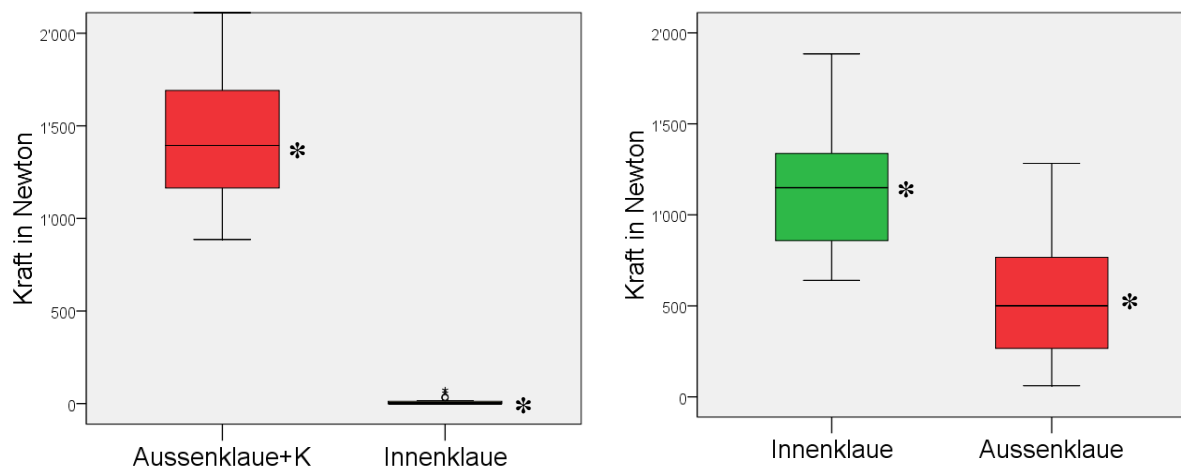


Abbildung 43: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) an der linken (links im Bild) und rechten (rechts im Bild) Vordergliedmasse, Messsituation linke Vordergliedmasse+K; dargestellt als Boxplots mit Median, 25%- und 75%-Quartilen und Whiskern bei minus / plus 1.5 mal dem Interquartilsabstand. * = signifikanter Unterschied zwischen Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Vordergliedmasse.

An der linken Vordergliedmasse war bei allen 28 Tieren die grössere Kraft an der Aussenklaue+K zu finden. An der rechten Vordergliedmasse wurde diese bei 24 von 28 Tieren an der Innenklaue registriert (Abb. 44).

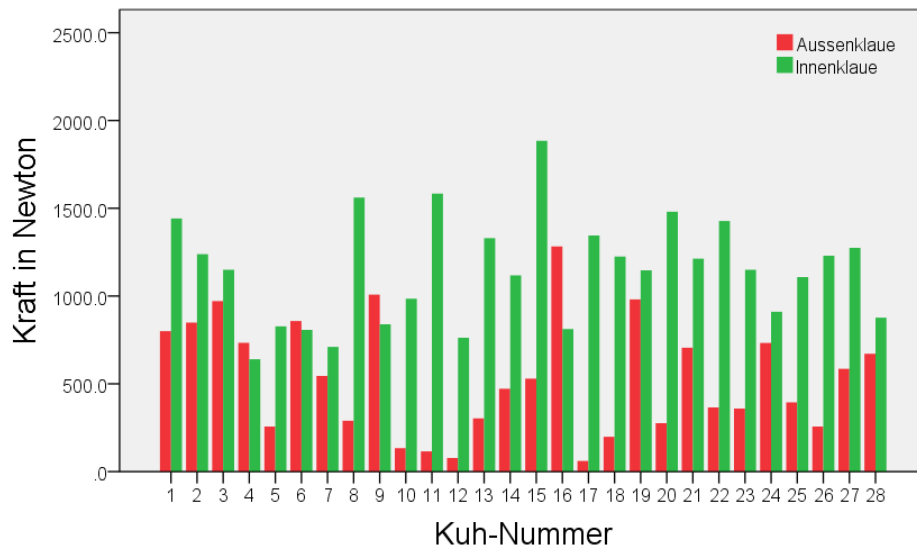


Abbildung 44: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) der rechten Vordergliedmasse bei jeder der 28 Kühe einzeln, Messsituation linke Vordergliedmasse+K.

An der Aussenklaue+K der linken Vordergliedmasse wurde in der Ballenzone eine signifikant grössere Kraft gemessen als in der Spitzenzone. Die kleine Kraft, die an der Innenklaue dieser Gliedmasse noch registriert wurde, wurde – aus den Kräfte-Mittelwerten berechnet – zu drei Vierteln von der Spitzenzone getragen. Innerhalb der Innenklaue der rechten Vordergliedmasse war wiederum die Ballenzone die signifikant stärker belastete Klauenzone: Hier betrug das Verhältnis der Kräfte-Mittelwerte ungefähr 1 zu 4 für Spitzen- zu Ballenzone. An der Aussenklaue der rechten Vordergliedmasse waren die beiden Hauptzonen nicht signifikant unterschiedlich belastet.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Kräfte an linker und rechter Vordergliedmasse wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Vordergliedmasse+K auf (Tab. 30). Allerdings wurde bei 18 von 28 Tieren von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin gleichzeitig eine Lastreduktion an der linken und eine Lastzunahme an der rechten Vordergliedmasse registriert, was für eine tendenzielle Kräfteverlagerung auf die rechte Vordergliedmasse spricht.

Tabelle 30: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Vordergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Vordergliedmasse | | | |
|----------|---|--|---|---------------------------------|---|------------------|---|--|
| A | 1599.8 (159.9) | | | | 1599.8 (159.9) | | | |
| M | 1500.5 (408.1) | | | | 1674.4 (368.7) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 478.6 (247.1) | | 1121.2 (206.8) * ² | | 1121.2 (206.8) | | 478.6 (247.1) | |
| | $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) * ¹ | | | | | | $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) | |
| M | 1490.0 (404.7) * ¹ | | 10.6 (18.9) | | 1145.5 (302.7) | | 528.9 (326.4) | |
| | | | $\tilde{x} = 1.3$ (Min = 0.0, Max = 73.6) * ² | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) * ⁶ | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) |
| | $\tilde{x} = 201.8$ (Min = 86.2, Max = 468.4) * ³ | $\tilde{x} = 231.3$ (Min = 0.6, Max = 576.7) * ⁴ | $\tilde{x} = 243.8$ (Min = 84.4, Max = 651.5) * ⁵ | | $\tilde{x} = 243.8$ (Min = 84.4, Max = 651.5) | | $\tilde{x} = 201.8$ (Min = 86.2, Max = 468.4) | $\tilde{x} = 231.3$ (Min = 0.6, Max = 576.7) |
| M | 446.1 (254.5) * ³ | 1043.9 (311.4) * ⁴ | 7.9 (14.3) | 2.7 (12.6) * ⁶ | 238.1 (118.9) | 907.5 (271.6) | 239.4 (137.7) | 289.5 (239.0) |
| | | | $\tilde{x} = 0.9$ (Min = 0.0, Max = 57.5) * ⁵ | | | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

An der linken Vordergliedmasse gab es an beiden Klauen signifikante Belastungsänderungen von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin: Bei allen 28 Tieren nahm die Kraft an der Aussenklaue zu und an der Innenklaue ab. Die Kräftezunahme an der Aussenklaue+K betrug im Median plus 220.3 %. Vergleicht man die beiden Mittelwerte der Kraft an der Aussenklaue, stellt man ein Verhältnis von ca. 1 zu 3 für Ausgangs- zu Messsituation linke Vordergliedmasse+K fest. Die Innenklaue war bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K im arithmetischen Mittel nur noch mit einem Hundertstel des Kräfte-

Mittelwertes der Ausgangssituation belastet (Kräfteabnahme im Median um minus 99.9 %). An der rechten Vordergliedmasse kam es zu keiner signifikanten Änderung der Kräfte an den beiden Klauen. Bei einer Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) war eine Zunahme der Kraft an der Aussenklaue von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin festzustellen (im Median um 28.4 %). Allerdings fand nur bei 8 dieser 17 Tiere gleichzeitig an der Innenklaue eine Abnahme der Kraft statt. Die aus den Kräfte-Mittelwerten berechnete prozentuale Verteilung der Gliedmassenlast auf die beiden Klauen änderte sich demnach auch nur in geringem Masse, nämlich um 1.7 Prozentpunkte zu Lasten der Aussenklaue (von 29.9 % auf 31.6 % der Gliedmassenlast), was aber ebenfalls für eine Tendenz der Verschiebung der Kräfte in Richtung Aussenklaue spricht.

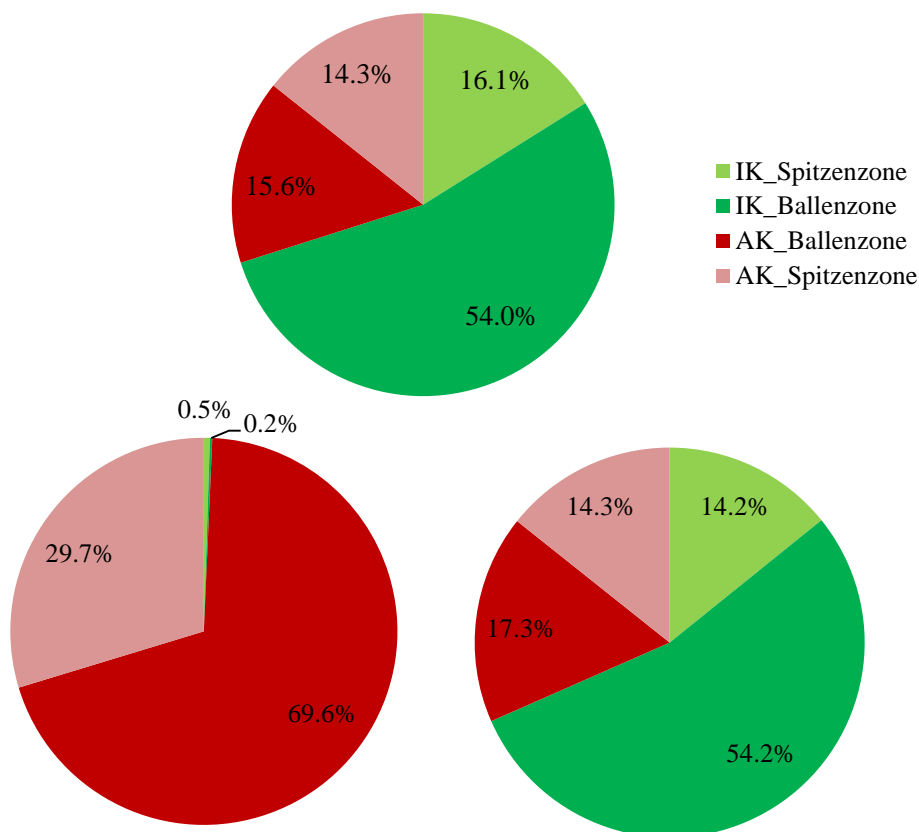


Abbildung 45: Vergleich der Kräfteverteilung (% , Mittelwerte) auf die Klauenzonen einer Vordergliedmasse bei der Ausgangssituation (oben im Bild) (Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt) und der linken (unten links im Bild) respektive rechten (unten rechts im Bild) Vordergliedmasse bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K. 100 % = Gewichtskraft an einer Vordergliedmasse. AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

An der linken Vordergliedmasse änderte sich die Belastung von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin in allen der insgesamt vier Hauptzonen signifikant, bei der rechten in keiner. Die Kräfte in Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue+K der linken Vordergliedmasse nahmen signifikant zu. Diese Zunahmen fanden jeweils bei einer Mehrheit der Tiere (bei 24 respektive 28 von 28) statt und waren sehr deutlich: Die Kraft in der Spitzenzone vergrösserte sich im Median um das Doppelte (um plus 105.2 %), diejenige in der Ballenzone um das Vierfache (um plus 316.9 %) (Abb. 45). An der Innenklaue der linken Vordergliedmasse, welche durch den Kothurn entlastet werden sollte, nahmen die Kräfte in beiden Klauenzonen sehr stark ab (im Median um 99.7 % in der Spitzen- respektive um 100.0 % in der Ballenzone). Diese Kräfte reduktionen waren jeweils bei allen 28 Tieren festzustellen. An der rechten Vordergliedmasse gab es keine signifikanten Kräfte-Änderungen zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Nennenswert ist allerdings die Kräftezunahme in den beiden Hauptzonen der Aussenklaue bei einer Mehrheit der Tiere (bei je 17 von 28). In der Ballenzone lag diese Zunahme im Median sogar bei plus 40.1 %.

6.4.2.2. *Flächen der Klauenabdrücke*

Aufgrund dessen, dass eine Klaue kaum noch belastet wurde, wiesen linke und rechte Vordergliedmasse signifikant unterschiedliche Klauenabdruckflächen auf (Tab. 31). Bei 24 von 28 Kühen war die Abdruckfläche der Klauen der rechten Vordergliedmasse grösser als diejenige der Klauen der linken Vordergliedmasse+K, und zwar im Median um 46.7 % (bezogen auf die Abdruckfläche der Klauen der linken Vordergliedmasse).

Tabelle 31: Abdruckflächen (in cm²) und Flächenanteile (in %) an der linken und rechten Vordergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ).

| | Linke Vordergliedmasse | | | | Rechte Vordergliedmasse | | | |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | 56.8 (10.2) * ¹ | | | | 83.4 (18.5) * ¹ | | | |
| <i>Anteil (%) an beiden VGLM</i> | 40.5 | | | | 59.5 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | (Kothurn) | | | | | | | |
| | 54.9 (10.4) * ^{2,4} | | 1.9 (2.7) * ^{2,5} | | 47.2 (6.5) * ^{3,5} | | 36.2 (15.0) * ^{3,4} | |
| <i>Anteil (%) an einer VGLM</i> | 96.7 | | 3.3 | | 56.6 | | 43.4 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 19.9 | 35.0 | 1.5 (2.2) | 0.4 (1.4) | 15.5 | 31.6 | 16.3 | 19.9 |
| | (6.2) * ^{6,10} | (7.2) * ^{6,11} | * ^{7,12} | * ^{7,13} | (3.7) * ^{8,12} | (4.2) * ^{8,13} | (4.9) * ^{9,10} | (11.3) * ^{9,11} |
| <i>Anteil (%) an einer Klaue</i> | 36.2 | 63.8 | 78.9 | 21.1 | 33.0 | 67.0 | 45.0 | 55.0 |
| <i>Anteil (%) an einer VGLM</i> | 35.0 | 61.6 | 2.7 | 0.7 | 18.6 | 38.0 | 19.5 | 23.9 |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Sowohl innerhalb der linken Vordergliedmasse+K als auch innerhalb der rechten Vordergliedmasse waren die Abdruckflächen von Aussen- und Innenklaue signifikant unterschiedlich gross. Auch die Abdruckflächen der beiden Aussen- und diejenigen der beiden Innenklauen unterschieden sich signifikant. Die Innenklaue der linken Vordergliedmasse war bei 10 von 28 Tieren komplett in der Luft (keine Abdruckfläche registriert) und machte – berechnet aus den Flächen-Mittelwerten – nur noch 3.3 % der Abdruckfläche der linken Vordergliedmasse aus. Bei der rechten Vordergliedmasse war die Abdruckfläche der Innenklaue deutlich grösser als diejenige der Aussenklaue, und zwar bei 21 von 28 Tieren.

Wie schon bei den zuvor beschriebenen Messsituationen gab es eine grosse Spannweite bei den Klauenabdruckflächen zwischen den Kühen. Dabei war diese an der Aussenklaue der rechten Vordergliedmasse am stärksten ausgeprägt: Ihr Minimum lag bei 7.5 cm² und ihr Maximum bei 65.4 cm². An der Innenklaue dieser Gliedmasse mass die Abdruckfläche zwischen 35.4 cm² und 59.2 cm², an der Aussenklaue+K der linken Vordergliedmasse zwischen 36.9 cm² und 77.7 cm² und an der entlasteten Innenklaue der linken Vordergliedmasse zwischen 0.0 cm² und 9.0 cm².

Innerhalb jeder der vier Klauen der beiden Vordergliedmassen fielen Spitzen- und Ballenzone jeweils signifikant unterschiedliche Abdruckflächen zu. Die Ballenzone wies ausser an der Innenklaue der linken Vordergliedmasse+K jeweils einen grösseren Flächen-Mittelwert auf als die Spitzenzone. An dieser entlasteten Innenklaue hingegen berührte die Klauenspitze den Boden mehr als der Ballen.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Abdruckfläche der Klauen der linken Vordergliedmasse nahm von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin signifikant ab (Tab. 32). Diese Flächenreduktion fand bei einer grossen Mehrheit der Tiere (bei 25 von 28) und im Median um knapp einen Drittel des Wertes der Ausgangssituation (genau um minus 31.2 %) statt. An der rechten Vordergliedmasse gab es beim Mittelwertvergleich keine signifikante Veränderung der Klauenabdruckfläche, allerdings kam es bei einer Mehrheit der Tiere (bei 18 von 28) zu einer Flächenzunahme.

An der linken Vordergliedmasse änderten sich die Abdruckflächen von Aussen- und Innenklaue von der Ausgangs- zur Messsituation hin signifikant: An der entlasteten Innenklaue nahm die Fläche bei allen 28 Tieren und im Median um 98.1 % ab. An der Aussenklaue+K kam es zu einer Flächenzunahme bei 27 von 28 Tieren, im Median um 58.9 %. An der rechten Vordergliedmasse zeigten sich hingegen bei den Abdruckflächen von Aussen- und Innenklaue keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Messsituationen.

Tabelle 32: Vergleich der Klauenabdruckflächen (in cm²) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Vordergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Vordergliedmasse | | | |
|----------|-------------------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| A | 78.5 (19.0) * ¹ | | | | 78.5 (19.0) | | | |
| M | 56.8 (10.2) * ¹ | | | | 83.4 (18.5) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 32.9 (13.4) * ² | | 45.6 (6.9) * ³ | | 45.6 (6.9) | | 32.9 (13.4) | |
| M | 54.9 (10.4) * ² | | 1.9 (2.7) * ³ | | 47.2 (6.5) | | 36.2 (15.0) | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 16.2 (4.5) | 16.7 (10.3) | 15.7 (3.3) | 29.9 (4.8) | 15.7 (3.3) | 29.9 (4.8) | 16.2 (4.5) | 16.7 (10.3) |
| | * ⁴ | * ⁵ | * ⁶ | $\tilde{x} = 29.2$ | | $\tilde{x} = 29.2$ | | |
| | | | | (Min = 21.7, | | (Min = 21.7, | | |
| | | | | Max = 46.5) | | Max = 46.5) | | |
| | | | | * ⁷ | | | | |
| M | 19.9 (6.2) | 35.0 (7.2) | 1.5 (2.2) * ⁶ | 0.4 (1.4) * ⁷ | 15.5 (3.7) | 31.6 (4.2) | 16.3 (4.9) | 19.9 (11.3) |
| | * ⁴ | * ⁵ | | | | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Passend zu den Abdruckflächen der Einzelklauen verhielten sich diejenigen der Klauenzonen: An der linken Vordergliedmasse nahm die Abdruckfläche von Spitzen- und Ballenzone der Aussenklaue+K signifikant zu. In der Ballenzone verdoppelte sich die Abdruckfläche sogar beim Vergleich der beiden Mittelwerte und auch im Median (genaue Zunahme: 96.6 %). An der entlasteten Innenklaue der linken Vordergliedmasse verringerten sich die Abdruckflächen der beiden Hauptzonen signifikant (im Median um 96.4 % respektive 100.0 %). An der rechten Vordergliedmasse kam es zu keinen signifikanten Änderungen der Abdruckflächen der einzelnen Klauenzonen. Die Abdruckflächen der Spitzen- und Ballenzone an der dortigen Aussenklaue unterschieden sich aber beim Gegenüberstellen der beiden Mittelwerte bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K deutlicher als bei der Ausgangssituation, was auf eine Flächenzunahme der Ballenzone bei 21 von 28 Tieren zurückzuführen war (im Median um 35.9 %).

6.4.2.3. Mittlere Drücke

An linker und rechter Vordergliedmasse wurden signifikant unterschiedliche mittlere Drücke gemessen (Tab. 33). Bei 21 von 28 Tieren war an der linken Vordergliedmasse+K ein grösserer mittlerer Druck zu finden als an der rechten.

Tabelle 33: Mittlere Drücke (in kPa) an der linken und rechten Vordergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke Vordergliedmasse | | | | Rechte Vordergliedmasse | | | |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|---|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| 265.6 (64.1) * ¹ | | | | 207.0 (51.6) | | | |
| | | | | $\tilde{x} = 211.6$ (Min = 127.0, Max = 303.7) * ¹ | | | |
| Aussenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| 273.9 (69.8) * ^{2,4} | | 33.8 (22.3) * ^{2,5} | | 247.2 (77.3) * ^{3,5} | | 132.9 (50.4) * ^{3,4} | |
| SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| 206.0 (74.1) | 303.8 (97.7) | 33.3 (18.6) | 28.5 (26.2) | 152.0 (64.8) | 290.3 (96.0) | 140.5 (59.6) | 114.5 (64.6) |
| * ^{6,9} | * ^{6,10} | * ¹¹ | * ¹² | * ^{7,11} | * ^{7,12} | * ^{8,9} | * ^{8,10} |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An beiden Vordergliedmassen unterschieden sich die mittleren Drücke zwischen Aussen- und Innenklaue sowie zwischen den beiden Aussen- und den beiden Innenklauen signifikant. An der linken Vordergliedmasse war bei allen 28 Tieren der mittlere Druck an der Aussenklaue+K grösser als derjenige an der Innenklaue (beim Vergleich der Mittelwerte um das Achtfache). Bei 10 von 28 Tieren betrug der mittlere Druck an der Innenklaue aufgrund komplett fehlender Belastung 0.0 kPa. An der rechten Vordergliedmasse war der mittlere Druck an der Innenklaue bei 23 von 28 Tieren grösser als derjenige an der Aussenklaue, und zwar beim Vergleich der Mittelwerte fast um das Doppelte.

Auf Klauenzonenlevel waren signifikante Unterschiede im mittleren Druck zwischen Spitzen- und Ballenzone innerhalb der Aussenklaue+K sowie innerhalb der beiden Klauen der rechten Vordergliedmasse zu finden. An der Aussenklaue+K der linken und der Innenklaue der rechten Vordergliedmasse wurde in der Ballenzone ein signifikant grösserer mittlerer Druck ge-

messen als in der Spitzenzone; an der Aussenklaue der rechten Vordergliedmasse war es umgekehrt.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der mittlere Druck an der linken Vordergliedmasse nahm von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin signifikant zu, derjenige an der rechten Vordergliedmasse zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Messsituationen (Tab. 34). Die Zunahme des mittleren Druckes an der linken Vordergliedmasse+K betrug im Median 20.4 % und war bei 21 der 28 Tiere zu finden.

Tabelle 34: Vergleich der mittleren Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Vordergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Vordergliedmasse | | | |
|----------|--|--|--|--|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A | 217.5 (σ = 50.8) * ¹ | | | | 217.5 (σ = 50.8) | | | |
| M | 265.6 (σ = 64.1) * ¹ | | | | 207.0 (σ = 51.6) | | | |
| | | | | | \tilde{x} = 211.6 (Min = 127.0, Max = 303.7) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 139.5 (σ = 46.5) * ² | | 253.0 (σ = 67.1) * ³ | | 253.0 (σ = 67.1) | | 139.5 (σ = 46.5) | |
| M | 273.9 (σ = 69.8) * ² | | 33.8 (σ = 22.3) * ³ | | 247.2 (σ = 77.3) | | 132.9 (σ = 50.4) | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 136.1 (σ = 44.3) * ⁴ | 111.4 (σ = 72.2) * ⁵ | 164.5 (σ = 61.9) * ⁶ | 295.4 (σ = 79.2) * ⁷ | 164.5 (σ = 61.9) | 295.4 (σ = 79.2) | 136.1 (σ = 44.3) | 111.4 (σ = 72.2) |
| M | 206.0 (σ = 74.1) * ⁴ | 303.8 (σ = 97.7) * ⁵ | 33.3 (σ = 18.6) * ⁶ | 28.5 (σ = 26.2) * ⁷ | 152.0 (σ = 64.8) | 290.3 (σ = 96.0) | 140.5 (σ = 59.6) | 114.5 (σ = 64.6) |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

An Aussen- und Innenklaue der linken Vordergliedmasse traten signifikante Änderungen des mittleren Druckes zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Vordergliedmasse+K auf, nicht so an den Klauen der rechten Vordergliedmasse. An der Aussenklaue der linken

Vordergliedmasse vergrösserte sich der mittlere Druck durch das Anbringen des Kothurns bei allen 28 Tieren und im Median auf mehr als das Doppelte (Zunahme um 109.6 %). An der Innenklaue dieser Gliedmasse war die Entlastung sehr stark: Der mittlere Druck wurde dort bei allen 28 Tieren und im Median um 94.0 % kleiner.

Wie auf Klauenlevel verhielten sich die mittleren Drücke auch auf Klauenzonenlevel: Innerhalb der Innenklaue der linken Vordergliedmasse nahmen die mittleren Drücke in beiden Hauptzonen von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin signifikant ab, innerhalb der Aussenklaue dieser Gliedmasse signifikant zu. In den beiden Ballenzonen war der Unterschied jeweils deutlicher als in der Spitzenzone. In den Klauenzonen der rechten Vordergliedmasse kam es zu keinen signifikanten Druckänderungen.

6.4.2.4. *Maximale Drücke*

Die Maximaldrücke an linker und rechter Vordergliedmasse unterschieden sich nicht signifikant (Tab. 35). Bei 17 von 28 Kühen war der Maximaldruck aber an der rechten Vordergliedmasse grösser als an der linken Vordergliedmasse+K, im Median allerdings nur um 6.0 %.

Die Maximaldrücke zwischen Aussen- und Innenklaue innerhalb beider Vordergliedmassen sowie zwischen beiden Aussenklauen und beiden Innenklauen unterschieden sich jeweils signifikant. An der linken Vordergliedmasse war der Maximaldruck an der Innenklaue signifikant kleiner als derjenige an der Aussenklaue+K (bei allen 28 Tieren) und betrug im Median nur 3.4 % des Maximaldruckes an der Aussenklaue+K. An der rechten Vordergliedmasse waren die Verhältnisse beim Vergleich der Maximaldruck-Mittelwerte und bei 24 von 28 Tieren umgekehrt, aber weitaus weniger stark ausgeprägt: Der Maximaldruck an der Innenklaue war im Median um 77.0 % grösser als derjenige an der Aussenklaue.

Innerhalb der Aussenklaue+K und der Innenklaue der linken Vordergliedmasse sowie innerhalb der Innenklaue der rechten Vordergliedmasse wurden in den Spitzen- und Ballenzonen jeweils signifikant unterschiedliche Maximaldrücke gemessen, nicht so innerhalb der Aussenklaue der rechten Vordergliedmasse. An der Aussenklaue+K und der Innenklaue der rechten Vordergliedmasse war der grössere Maximaldruck-Mittelwert in der Ballenzone, bei der entlasteten Innenklaue der linken Vordergliedmasse in der Spitzenzone zu finden.

Tabelle 35: Maximale Drücke (in kPa) an der linken und rechten Vordergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke Vordergliedmasse | | | | Rechte Vordergliedmasse | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1163.3 (293.3) | | | | 1246.0 (407.9) | | | |
| Aussenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| 1163.3 (293.3) * ^{1,3} | | 39.7 (60.1) $\tilde{x} = 7.3$ (Min = 0.0, Max = 196.3) * ^{1,4} | | 1186.2 (447.2) * ^{2,4} | | 599.5 (270.2) * ^{2,3} | |
| SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| 856.4 (270.1) * ^{5,9} | 1149.1 (302.8) * ^{5,10} | 37.2 (23.2) $\tilde{x} = 7.3$ (Min = 0.0, Max = 196.3) * ^{6,11} | 8.5 (23.2) * ^{6,12} | 557.1 (247.2) * ^{7,11} | 1180.8 (448.6) * ^{7,12} | 492.4 (248.3) * ^{8,9} | 481.7 (294.6) * ^{8,10} |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Bei der Auszählung, auf welche der sieben Klauenzonen bei den total 100 Messungen an den Vordergliedmassen der höchste Maximaldruck fiel, zeigte sich folgende Verteilung (Abb. 46):

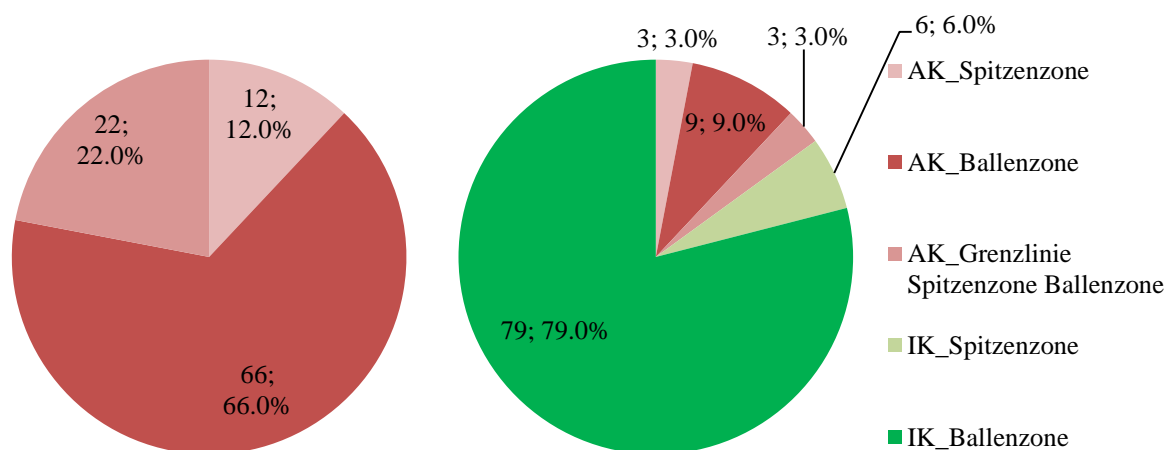


Abbildung 46: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken (links im Bild) und rechten Vordergliedmasse (rechts im Bild) ausgezählt (100 % = je 100 Messungen). AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

An der linken Vordergliedmasse war der Maximaldruck bei allen 100 Messungen an deren Aussenklaue+K zu finden. An der rechten Vordergliedmasse war er bei 85 von 100 Messungen an der Innenklaue lokalisiert.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der Maximaldruck änderte weder an der linken noch an der rechten Vordergliedmasse signifikant von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin (Tab. 36). Bei je einer Hälfte der Tiere war er sowohl an der linken Vordergliedmasse+K als auch an der rechten Gliedmasse zu- respektive abnehmend.

An der Innenklaue der linken Vordergliedmasse war der Maximaldruck bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K signifikant kleiner als bei der Ausgangssituation (Abnahme bei allen 28 Tieren und im Median um 99.4 %) und betrug im Mittelwert nur noch etwas mehr als drei Hundertstel (genau: 3.3 %) des Mittelwertes, welcher bei der Ausgangssituation registriert wurde. Der Maximaldruck an der Aussenklaue+K hingegen war im Mittelwert fast doppelt so gross wie derjenige an der Aussenklaue bei der Ausgangssituation (genau: 194.6 % des Mittelwertes der Ausgangssituation); dort gab es also eine signifikante Zunahme im Maximaldruck von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin (bei allen 28 Tieren und im Median um 88.1 %). An Aussen- und Innenklaue der rechten Vordergliedmasse unterschieden sich die Maximaldrücke zwischen den beiden Messsituationen nicht signifikant.

Auf Klauenzonenlevel nahm der maximale Druck in den beiden Hauptzonen der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin signifikant zu, in denen der Innenklaue dieser Gliedmasse signifikant ab. Der Mittelwert des maximalen Druckes unter der Ballenzone des Kothurns an der Aussenklaue war 2.6-fach grösser als derjenige an der Aussenklaue bei der Ausgangssituation; derjenige des Maximaldruckes in der Ballenzone der Innenklaue dieser Gliedmasse sank auf einen Hundertstel des Mittelwertes der Ausgangssituation. An der rechten Vordergliedmasse gab es wie auf Klauenlevel auch auf Klauenzonenlevel keine signifikanten Änderungen im maximalen Druck.

Tabelle 36: Vergleich der maximalen Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Vordergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Vordergliedmasse | | | |
|----------|--|----------------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|--|------------------|
| A | 1258.0 (378.0) | | | | 1258.0 (378.0) | | | |
| M | 1163.3 (293.3) | | | | 1246.0 (407.9) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 600.7 (239.4) * ¹ | | 1206.2 (371.6) * ² | | 1206.2 (371.6) | | 600.7 (239.4) | |
| M | 1163.3 (293.3) * ¹ | | 39.7 (60.1) | | 1186.2 (447.2) | | 599.5 (270.2) | |
| | | | $\tilde{x} = 7.3$ (Min = 0.0, Max = 196.3) * ² | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 492.3 (199.2) * ³ | 442.5 (298.8) | 613.5 (228.3) * ⁵ | 1204.9 (372.5) * ⁶ | 613.5 (228.3) | 1204.9 (372.5) | 492.3 (199.2) | 442.5 (298.8) |
| | $\tilde{x} = 368.1$ (Min = 19.4, Max = 1041.1) * ⁴ | | | | | | $\tilde{x} = 368.1$ (Min = 19.4, Max = 1041.1) | |
| M | 856.4 (270.1) * ³ | 1149.1 (302.8) * ⁴ | 37.2 (23.2) $\tilde{x} = 7.3$ (Min = 0.0, Max = 196.3) * ⁵ | 8.5 (23.2) * ⁶ | 557.1 (247.2) | 1180.8 (448.6) | 492.4 (248.3) | 481.7 (294.6) |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Der Maximaldruck war bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K in keinem Fall mehr an der Innenklaue zu finden, im Gegensatz zur Ausgangssituation, wo er noch bei einer Mehrheit der Vordergliedmassen (bei 44 von 56) dort lokalisiert war. An der rechten Vordergliedmasse wurde der Maximaldruck bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K im Vergleich zur Ausgangssituation dafür leicht häufiger an der Innenklaue registriert (bei 85 von 100 Messungen [85.0 %] versus bei 44 von 56 Messungen [78.6 %]) und dort häufiger in der Ballenzone (bei 79 von 100 Messungen [79.0 %] versus bei 41 von 56 Messungen [73.2 %]).

6.4.2.5. *Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Vordergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Vordergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand*

Weder in x- noch in y-Richtung unterschieden sich die Abstände der Schwerpunkte von linker respektive rechter Vordergliedmasse zum Gliedmassenpaarschwerpunkt signifikant. Bei 19 von 28 Tieren aber war der Abstand des linken Gliedmassenschwerpunktes ($\mu_L = 15.7$ cm, $\sigma = 4.4$) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt in x-Richtung grösser als der korrespondierende Abstand für die rechte Vordergliedmasse ($\mu_R = 13.8$ cm, $\sigma = 4.2$) (Abb. 47). Das Verhältnis der beiden Abstände in x-Richtung (53.2 % zu 46.8 %) korrelierte stark negativ mit der prozentualen Gewichtsverteilung auf die beiden Vordergliedmassen, welche durchschnittlich 47.3 % (links) zu 52.7 % (rechts) betrug ($r = -0.998^{**}$).

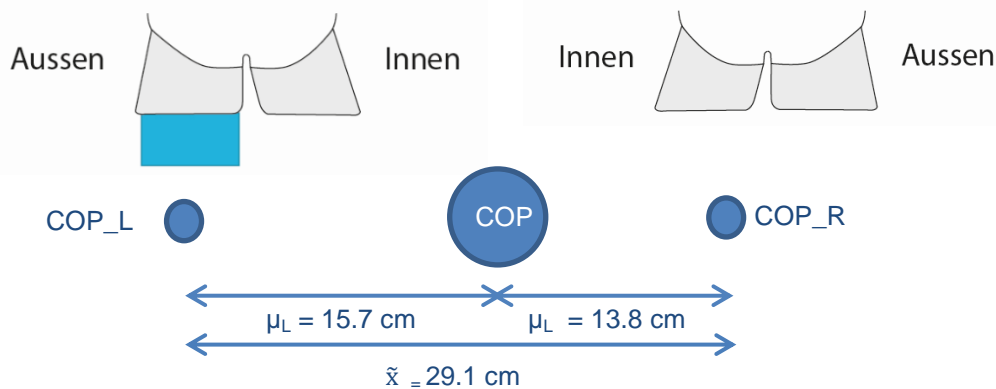


Abbildung 47: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) respektive Mediane (\tilde{x}) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Vordergliedmassen bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K.

Wie in x-Richtung war auch in y-Richtung bei 19 von 28 Tieren der Abstand des linken Gliedmassenschwerpunktes+K ($\mu_L = 2.7$ cm, $\sigma = 1.9$) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt grösser als derjenige der rechten Vordergliedmasse ($\mu_R = 2.3$ cm, $\sigma = 1.5$). Diese Zahlen sagen jedoch nichts darüber aus, ob die Gliedmassen in y-Richtung gegen kranial oder gegen kaudal vom Gliedmassenpaarschwerpunkt entfernt waren. Bei der Analyse aller 100 Messungen konnte festgestellt werden, dass bei einer knappen Mehrheit (bei 53 von 100 Messungen) die linke Vordergliedmasse+K weiter kranial platziert war als die rechte, bei 37 von 100 Messungen war es umgekehrt, und bei 10 Messungen waren beide Gliedmassen ungefähr auf einer Linie platziert. Die Spurbreite der Vordergliedmassen betrug im Median 29.1 cm

(Min = 18.4, Max = 39.3) und der Vor-Rück-Beinabstand im arithmetischen Mittel 5.1 cm ($\sigma = 3.1$).

Zwischen der Spurbreite und den Gewichtskräften an beiden Innenklauen der Vordergliedmassen war eine positive Korrelation mit mittlerem respektive schwachem Effekt festzustellen (Korrelationskoeffizienten nach Spearman: $r = 0.392$ * für Innenklaue der linken Vordergliedmasse+K und $r = 0.172$ für Innenklaue der rechten Vordergliedmasse); das heisst, mit zunehmender Spurweite wurden die Innenklauen stärker belastet. An der Aussenklaue der rechten Vordergliedmasse war parallel dazu eine schwach negative Korrelation (Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -0.097$) zu finden, an derjenigen der linken Vordergliedmasse+K gab es keinen Zusammenhang zwischen Kraft und Spurweite.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der Abstand des Schwerpunktes der linken Vordergliedmasse zum Gliedmassenpaarschwerpunkt in x-Richtung unterschied sich als einziger aller in diesem Abschnitt beschriebenen Parameter signifikant zwischen den beiden Messsituationen: Und zwar nahm dieser Abstand von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin im Median um 16.3 % zu. Die Spurbreite war bei einer Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K grösser (im Median um 10.5 %) als bei der Ausgangssituation. Im Vergleich zur Ausgangssituation war bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K häufiger die linke Vordergliedmasse kranialer platziert als die rechte (bei 53 von 100 Messungen [53.0 %] versus bei 11 von 28 Messungen [39.3 %]).

6.4.2.6. Zusammenfassung Messsituation linke Vordergliedmasse+K (Vordergliedmassen)

Bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K fielen innerhalb der linken Vordergliedmasse der Aussenklaue+K und ihrer Ballenzone die bei einer Mehrheit der Tiere (auf Klauenlevel jeweils bei allen 28 Tieren) und bei Betrachtung der Mittelwerte grösste Kraft, grösste Abdruckfläche und gleichzeitig auch grössten mittleren und maximalen Drücke zu (Abb. 48). Im

Vergleich zur Ausgangssituation wurden an der linken Vordergliedmasse die Aussenklaue signifikant stärker und die Innenklaue signifikant geringer belastet.

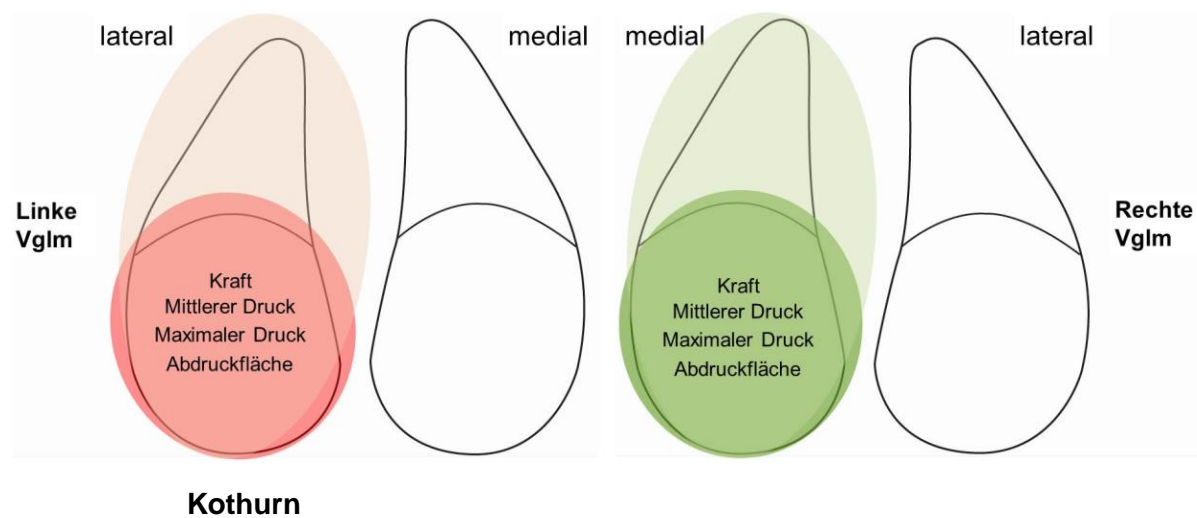


Abbildung 48: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an der linken und rechten Vordergliedmasse (Vglm), Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Darstellung anhand des arithmetischen Mittelwerts und der Mehrheit der Tiere (rot = Aussenklaue, grün = Innenklaue).

An der rechten Vordergliedmasse gab es zwar bei einer Mehrheit der Tiere von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin an der Aussenklaue und in ihrer Ballenzone eine Kräfte- und Maximaldruckzunahme; diese Zunahmen waren allerdings nicht signifikant. Zudem blieb es dort dabei, dass wie bei der Ausgangssituation bei einer Mehrheit der Tiere und bei Betrachtung der Mittelwerte die grössten Werte für die Parameter Kraft, Abdruckfläche, mittlerer sowie maximaler Druck an der Innenklaue und in ihrer Ballenzone zu finden waren (zur Übersicht über alle Veränderungen siehe Anhang, Abb. 59).

6.4.3. Messwerte für die Hintergliedmassen

Im Folgenden sind die Auswirkungen eines Kothurns an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse auf die Belastung der Hintergliedmassen aufgeführt. Die Gewichtskräfte werden im Detail, die übrigen Parameter (Abdruckfläche und Drücke) in einer Zusammenfassung präsentiert.

6.4.3.1. Gewichtskräfte

An linker und rechter Hintergliedmasse wurden keine signifikant unterschiedlichen Gewichtskräfte gemessen (Tab. 37). Die Gliedmassenpaarlast war beim Vergleich der beiden Kräfte-Mittelwerte beinahe gleichmässig auf die beiden Gliedmassen verteilt. Allerdings war bei einer Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) die Kraft, die an der rechten Hintergliedmasse gemessen wurde, grösser als diejenige an der linken (im Median um 4.5 % des Kraft-Wertes der linken Hintergliedmasse).

Tabelle 37: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an linker und rechter Hintergliedmasse, an den Aus- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich an (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke Hintergliedmasse | | | | Rechte Hintergliedmasse | | | |
|---|------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------|
| | 1382.6 (190.3) | | | | 1428.5 (209.2) | | | |
| <i>Anteil (%) an beiden HGLM</i> | 49.2 | | | | 50.8 | | | |
| <i>Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 23.0 | | | | 24.0 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | 936.0 (209.1) * ¹ | | 446.6 (163.1) * ¹ | | 496.4 (231.0) | | 932.1 (282.4) * ² | |
| | | | | | $\tilde{x} = 424.7$ | | | |
| | | | | | (Min 165.0, | | | |
| | | | | | Max = 1129.6) * ² | | | |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 67.7 | | 32.3 | | 34.7 | | 65.3 | |
| <i>Anteil (%) an beiden HGLM</i> | 33.3 | | 15.9 | | 17.7 | | 33.1 | |
| <i>Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 15.6 | | 7.5 | | 8.3 | | 15.6 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 318.7 | 617.4 | 227.9 | 218.8 | 216.7 | 279.7 | 300.9 | 631.2 |
| | (126.2) * ³ | (155.2) * ³ | (81.4) | (127.0) | (88.4) | (220.0) | (109.4) | (238.9) |
| | | | | | $\tilde{x} = 205.2$ | $\tilde{x} = 191.2$ | * ⁴ | * ⁴ |
| | | | | | (Min = | (Min = | | |
| | | | | | 52.3, | 11.7, | | |
| | | | | | Max = | Max = | | |
| | | | | | 511.0) | 958.0) | | |
| <i>Anteil (%) an einer Klaue</i> | 34.0 | 66.0 | 51.0 | 49.0 | 43.7 | 56.3 | 32.3 | 67.7 |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 23.1 | 44.6 | 16.5 | 15.8 | 15.2 | 19.5 | 21.1 | 44.2 |

HGLM = Hintergliedmasse. SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An beiden Hintergliedmassen war die Aussenklaue signifikant stärker belastet als die Innenklaue. An der linken Hintergliedmasse waren die Aussenklauen bei 27 von 28, an der rechten Hintergliedmasse bei 26 von 28 Tieren vermehrt belastet. Es gab keine signifikanten Unterschiede der Kräfte zwischen den kontralateralen Aussen- und Innenklauen. Innerhalb der beiden stärker belasteten Aussenklauen fiel eine signifikant grössere Kraft auf die Ballen- als auf die Spitzenzone. Innerhalb der beiden Innenklauen waren die beiden Hauptzonen jeweils ungefähr gleich stark belastet.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Kräfte an linker und rechter Hintergliedmasse änderten sich nicht signifikant von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin (Tab. 38). Allerdings war bei einer Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) eine Kräfteabnahme an der linken Hintergliedmasse festzustellen (im Median um 3.1 %). An der rechten Hintergliedmasse kam es bei je einer Hälfte der Tiere zu einer Ab- respektive Zunahme der Gewichtskraft.

Tabelle 38: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Vordergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Hintergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Hintergliedmasse | | | |
|---|--|------------------|-----------------|---------------------------------|---|---|------------------|------------------|
| A | 1423.9 (120.0) | | | | 1423.9 (120.0) | | | |
| M | 1382.6 (190.3) | | | | 1428.5 (209.2) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 935.4 (149.0) | | 488.5 (160.5) | | 488.5 (160.5) | | 935.4 (149.0) | |
| M | 936.0 (209.1) | | 446.6 (163.1) | | 496.4 (231.0) | | 932.1 (282.4) | |
| | $\tilde{x} = 424.7$ (Min 165.0, Max = 1129.6) | | | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 292.4 (84.0) | 643.0 (160.4) | 212.1 (93.5) | 276.4 (136.2) * ¹ | 212.1 (93.5) | 276.4 (136.2) | 292.4 (84.0) | 643.0 (160.4) |
| M | 318.7 (126.2) | 617.4 (155.2) | 227.9 (81.4) | 218.8 (127.0) * ¹ | 216.7 (88.4) | 279.7 (220.0) | 300.9 (109.4) | 631.2 (238.9) |
| | | | | | $\tilde{x} = 205.2$ (Min = 52.3, Max = 511.0) | $\tilde{x} = 191.2$ (Min = 11.7, Max = 958.0) | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Hintergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Auf Klauenlevel gab es zwischen den beiden Messsituationen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in den Gewichtskräften: Die Aussenklauen blieben die stärker belasteten Klauen. Innerhalb der linken Hintergliedmasse war aber bei einer Mehrheit der Tiere eine Reduktion der Kraft sowohl an der Aussen- (bei 18 von 28 Tieren und im Median um 5.6 %) als auch an der Innenklaue (ebenfalls bei 18 von 28 Tieren und im Median um 10.4 %) von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin festzustellen. An dieser Innenklaue befand sich mit ihrer Ballenzone die einzige Klauenzone, in welcher es zu einer signifikanten Kraftänderung kam, nämlich zu einer signifikanten Abnahme der Kraft (bei 18 von 28 Tieren und im Median um 25.5 %).

6.4.3.2. Zusammenfassung Messsituation linke Vordergliedmasse+K (Hintergliedmassen)

Wie bei der Ausgangssituation blieben bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K an beiden Hintergliedmassen die Aussenklauen und ihre Ballenzonen die Orte mit der grössten Kraft, der grössten Abdruckfläche und dem grössten mittleren sowie maximalen Druck, dies sowohl bei einer Mehrheit der Tiere als auch beim Vergleich der Mittelwerte (Abb. 49).

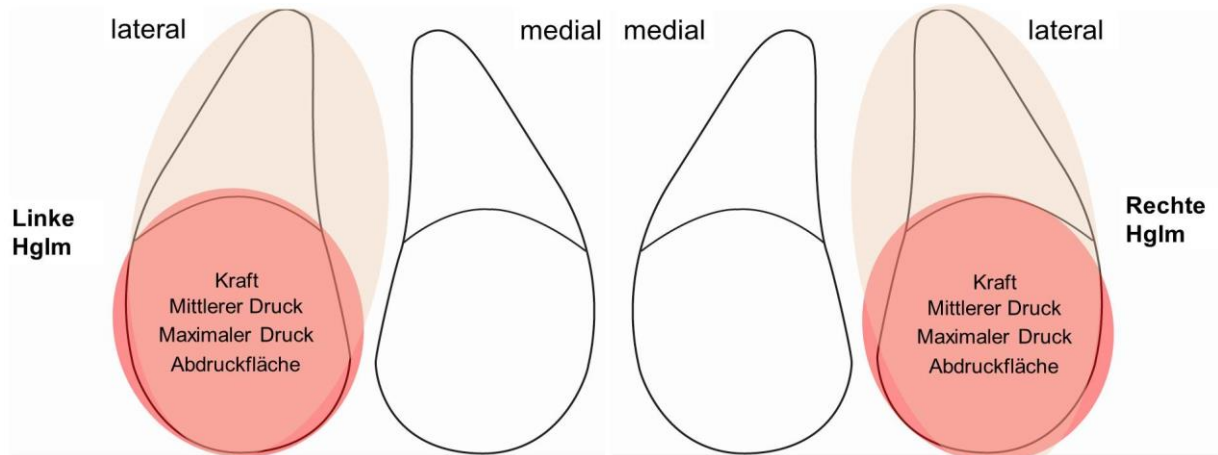


Abbildung 49: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an der linken und rechten Hintergliedmasse (Hglm), Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Darstellung anhand des arithmetischen Mittelwerts und der Mehrheit der Tiere (rot = Aussenklaue).

Innerhalb der linken Hintergliedmasse kam es sowohl an der Aussen- als auch an der Innenklaue bei einer Mehrheit der Tiere zu einer Reduktion von Kraft sowie mittlerem und maximalem Druck. In der Ballenzone der Innenklaue reduzierten sich diese drei Parameter sogar signifikant von der Ausgangs- zur Messsituation mit Kothurn hin. An der rechten Hintergliedmasse kam es im Vergleich zur Ausgangssituation zu einer signifikanten Reduktion des mittleren Druckes an der Spitzenzone der Innenklaue (siehe Abb. 60 im Anhang mit Darstellung aller Veränderungen der vier Haupt-Messparameter auf Klauen- und Klauenzonenlevel von der Ausgangs- zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin).

6.5. Messsituation «Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse»

6.5.1. Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen

Mit einem Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse (Messsituation linke Hintergliedmasse+K) lastete auf den Vordergliedmassen im arithmetischen Mittel eine Gewichtskraft von 3158.3 N ($\sigma = 253.2$) und auf den Hintergliedmassen eine von 2796.3 N ($\sigma = 250.5$). Die Belastung der beiden Gliedmassenpaare war signifikant unterschiedlich. Umgerechnet aus den Kräfte-Mittelwerten wurde das Körpergewicht zu 53.0 % von den Vorder- und zu 47.0 % von den Hintergliedmassen getragen.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Die Kräfte-Mittelwerte beider Gliedmassenpaare waren bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K etwas geringer als bei der Ausgangssituation. An den Hintergliedmassen war der Unterschied signifikant. Dort trat bei 21 von 28 Tieren von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin eine Kräftereduktion ein, im Median um 1.8 % des Wertes der Ausgangssituation. An den Vordergliedmassen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, allerdings war dort die Gewichtskraft bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K ebenfalls bei einer Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) kleiner als bei der Ausgangssituation, und zwar im Median um 1.5 %.

6.5.2. Messwerte für die Hintergliedmassen

6.5.2.1. Gewichtskräfte

Bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K war der an der linken Hintergliedmasse+K aus den Mittelwerten der Gewichtskräfte berechnete Kraftanteil mit 47.3 % leicht kleiner als derjenige an der rechten Hintergliedmasse mit 52.7 % (Tab. 39). Allerdings waren die beiden Gliedmassen nicht signifikant unterschiedlich stark belastet. Bei 17 der 28 Kühe war die rechte Hintergliedmasse mit mehr und die linke Hintergliedmasse+K dementsprechend mit weniger als der Hälfte der Gliedmassenpaarlast belastet. Bei den restlichen 11 Kühen herrschte ein umgekehrtes Verhältnis. Festzuhalten ist, dass nur bei 6 Tieren eine ziemlich ausgeglichene

prozentuale Gewichtsverteilung zwischen 47.0 % und 53.0 % vorzufinden war. Bei 22 Tieren war ein grösserer Lastunterschied zwischen den beiden Gliedmassen zu finden, das heisst die einzelnen Gliedmassen trugen Anteile von unter 47.0 % respektive über 53.0 % der Gliedmassenpaarlast.

Tabelle 39: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an linker und rechter Hintergliedmasse, an den Aus- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke Hintergliedmasse | | | | Rechte Hintergliedmasse | | | |
|---|-------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------|
| | 1322.4 (325.6) | | | | 1473.9 (336.7) | | | |
| <i>Anteil (%) an beiden HGLM</i> | 47.3 | | | | 52.7 | | | |
| <i>Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 22.2 | | | | 24.8 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | | | (Kothurn) | | | | | |
| | 25.2 (30.1) | | 1297.2 (309.5) * ^{1,4} | | 383.3 N (173.4) * ^{2,4} | | 1090.7 (298.8) * ^{2,3} | |
| | $\tilde{x} = 12.4$ | | | | | | | |
| | (Min = 0.0, | | | | | | | |
| | Max = 112.3) * ^{1,3} | | | | | | | |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 1.9 | | 98.1 | | 26.0 | | 74.0 | |
| <i>Anteil (%) an beiden HGLM</i> | 0.9 | | 46.4 | | 13.7 | | 39.0 | |
| <i>Anteil (%) an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 0.4 | | 21.8 | | 6.5 | | 18.3 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 21.6 | 3.6 | 400.4 | 896.8 | 197.4 | 185.9 | 299.2 | 791.4 |
| | (28.4) | (9.7) * ^{5,9} | (230.8) | (257.8) | (82.1) | (156.4) | (107.5) | (299.7) |
| | * ^{5,8} | $\tilde{x} = 0.0$ | $\tilde{x} =$ | * ^{6,11} | $\tilde{x} =$ | * ¹¹ | * ^{7,8} | * ^{7,9} |
| | $\tilde{x} = 8.4$ | (Min = | 369.8 | | 186.0 | | | |
| | (Min = | 0.0, | (Min = | | (Min = | | | |
| | 0.0, | Max = | 18.4, | | 29.4, | | | |
| | Max = | 45.4) | Max = | | Max = | | | |
| | 112.3) | | 1123.8) | | 484.9) * ¹⁰ | | | |
| | | | * ^{6,10} | | | | | |
| <i>Anteil (%) an einer Klaue</i> | 85.7 | 14.3 | 30.9 | 69.1 | 51.5 | 48.5 | 27.4 | 72.6 |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 1.6 | 0.3 | 30.3 | 67.8 | 13.4 | 12.6 | 20.3 | 53.7 |

HGLM = Hintergliedmasse. SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An beiden Hintergliedmassen waren Aussen- und Innenklaue jeweils signifikant unterschiedlich belastet. Die mit dem Kothurn versehene Innenklaue (Innenklaue+K) der linken Hintergliedmasse trug weitaus den grössten Anteil am Gliedmassengewicht. Die Aussenklaue war bei 8 von 28 Kühen komplett entlastet. An der rechten Hintergliedmasse war die Aussenklaue beim Vergleich der Kräfte-Mittelwerte beinahe dreimal so stark belastet wie die Innenklaue. Die Gewichtskräfte an den beiden stärker belasteten Klauen – der Innenklaue+K der linken und der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse – zeigten keinen signifikanten Unterschied. Folgende Abbildung (Abb. 50) dient der Visualisierung der unterschiedlichen Kräfteverteilung auf Aussen- und Innenklaue im Vergleich von linker Hintergliedmasse+K mit rechter Hintergliedmasse:

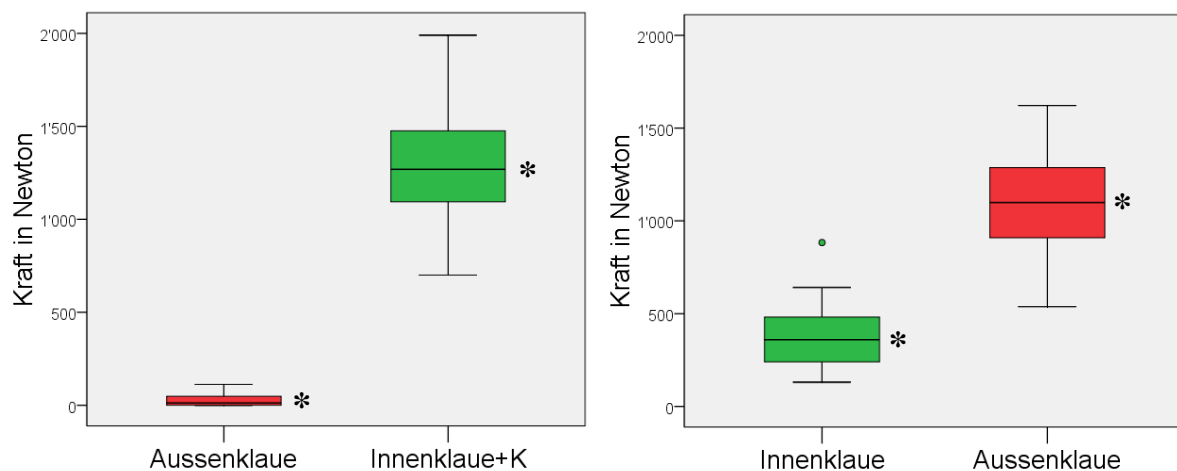


Abbildung 50: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) bei der linken (links) und rechten (rechts) Hintergliedmasse, Messsituation linke Hintergliedmasse+K; dargestellt als Boxplots mit Median, 25%- und 75%-Quartilen und Whiskern bei minus / plus 1.5 mal dem Interquartilsabstand. * = signifikanter Unterschied zwischen Aussen- und Innenklaue innerhalb einer Hintergliedmasse.

Bei allen 28 Tieren waren an der linken Hintergliedmasse die Innenklaue+K und an der rechten Hintergliedmasse die Aussenklaue (Abb. 51) die stärker belasteten Klauen. Auch die kontralateralen Aussen- und die kontralateralen Innenklauen wiesen jeweils signifikant unterschiedlich grosse Gewichtskräfte auf.

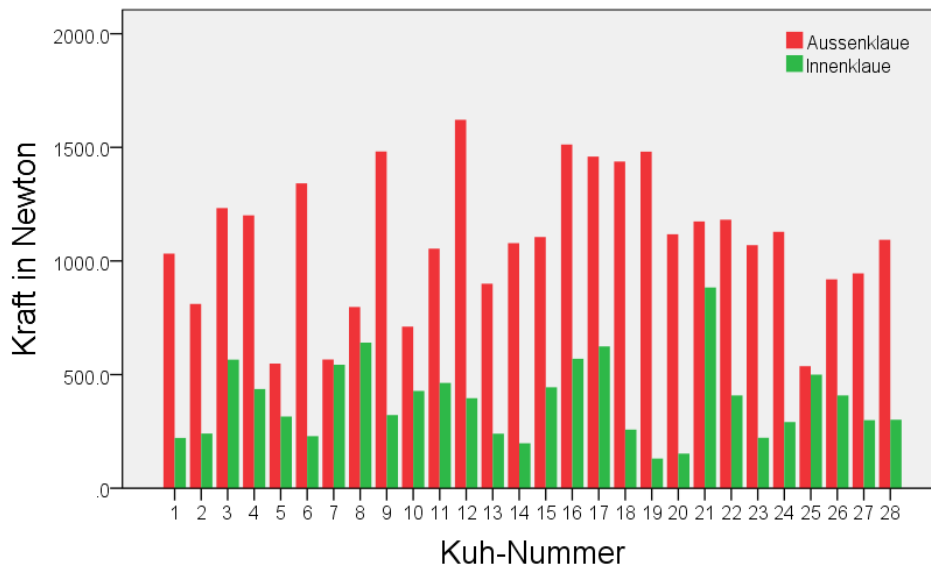


Abbildung 51: Gewichtskräfte (in N) an Aussen- (rot) und Innenklaue (grün) der rechten Hintergliedmasse bei jeder der 28 Kühe einzeln, Messsituation linke Hintergliedmasse+K.

Auf Klauenzonenlevel traten innerhalb von drei der vier Klauen signifikante Unterschiede in der Gewichtskraft zwischen Spitzen- und Ballenzone auf: Beim Vergleich der Kräfte-Mittelwerte wurden in der Ballenzone der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse beinahe drei Viertel der auf die Aussenklaue wirkenden Gewichtskraft und mehr als die Hälfte der auf die rechte Hintergliedmasse wirkenden Gewichtskraft gemessen. Innerhalb der mit einem Kothurn versehenen Innenklaue der linken Hintergliedmasse war ebenso die Ballenzone – im Mittelwert mit mehr als zwei Dritteln der Klauenlast – signifikant stärker belastet als ihre Spitzenzone. Die sehr kleine Kraft, die noch auf die Aussenklaue der linken Hintergliedmasse fiel, wurde hingegen im Mittelwert zu mehr als drei Vierteln in der Spitzenzone registriert. An der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse gab es in den beiden Hauptzonen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gewichtskräften.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Beim Vergleich der Ausgangs- mit der Messsituation linke Hintergliedmasse+K waren sowohl für die auf die linke als auch für die auf die rechte Hintergliedmasse fallenden Gewichtskräfte keine signifikanten Unterschiede festzustellen (Tab. 40). An der linken Hintergliedmasse wurde mit Kothurn bei einer Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) allerdings eine

geringere Kraft registriert als bei der Ausgangssituation. Bei 15 von 28 Kühen wurde die Kraft an der linken Hintergliedmasse kleiner und gleichzeitig diejenige an der rechten Hintergliedmasse grösser.

Tabelle 40: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Hintergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Hintergliedmasse | | | |
|----------|---|------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| A | 1423.9 (120.0) | | | | 1423.9 (120.0) | | | |
| M | 1322.4 (325.6) | | | | 1473.9 (336.7) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 935.4 (149.0) * ¹ | | 488.5 (160.5) * ² | | 488.5 (160.5) * ³ | | 935.4 (149.0) * ⁴ | |
| M | 25.2 (30.1) | | 1297.2 (309.5) * ² | | 383.3 (173.4) * ³ | | 1090.7 (298.8) * ⁴ | |
| | $\tilde{x} = 12.4$ | | | | | | | |
| | (Min = 0.0, Max = 112.3) * ¹ | | | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 292.4 | 643.0 | 212.1 | 276.4 | 212.1 | 276.4 | 292.4 | 643.0 |
| | (84.0) * ⁵ | (160.4) * ⁶ | (93.5) | (136.2) | (93.5) | (136.2) * ⁹ | (84.0) | (160.4) * ¹⁰ |
| | | | * ⁷ | * ⁸ | | | | |
| M | 21.6 (28.4) | 3.6 (9.7) | 400.4 | 896.8 | 197.4 | 185.9 | 299.2 | 791.4 |
| | $\tilde{x} = 8.4$ | $\tilde{x} = 0.0$ | (230.8) | (257.8) * ⁸ | (82.1) | (156.4) * ⁹ | (107.5) | (299.7) * ¹⁰ |
| | (Min = 0.0, | (Min = 0.0, | $\tilde{x} = 369.8$ | | $\tilde{x} = 186.0$ | | | |
| | Max = 112.3) | Max = 45.4) | (Min = 18.4, | | (Min = 29.4, | | | |
| | * ⁵ | * ⁶ | Max = | | Max = 484.9) | | | |
| | | | 1123.8) * ⁷ | | | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. + = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Hintergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Sowohl an der linken als auch an der rechten Hintergliedmasse unterschieden sich die Kräfte an den Aussen- sowie an den Innenklauen zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant. An der linken Hintergliedmasse trug die Aussenklaue aufgrund der Entlastung durch den Kothurn – berechnet aus den Kräfte-Mittelwerten – nur noch 1.9 % im Vergleich zu 65.7 % (bei der Ausgangssituation) der Gliedmassenlast. Bei allen 28 Tieren fand an dieser Klaue eine Kräfteabnahme (im Median um 98.1 %) und an der Innenklaue+K eine Kräftezunahme (im Median um 178.1 %) statt. Die Aussenklaue der rech-

ten Hintergliedmasse war bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K im Median um 10.7 % des Wertes der Ausgangssituation stärker belastet. Eine Zunahme der Kraft war dort bei 21 von 28 Kühen zu finden. An der Innenklaue war parallel dazu bei 19 von 28 Kühen eine Kräfteabnahme zu finden.

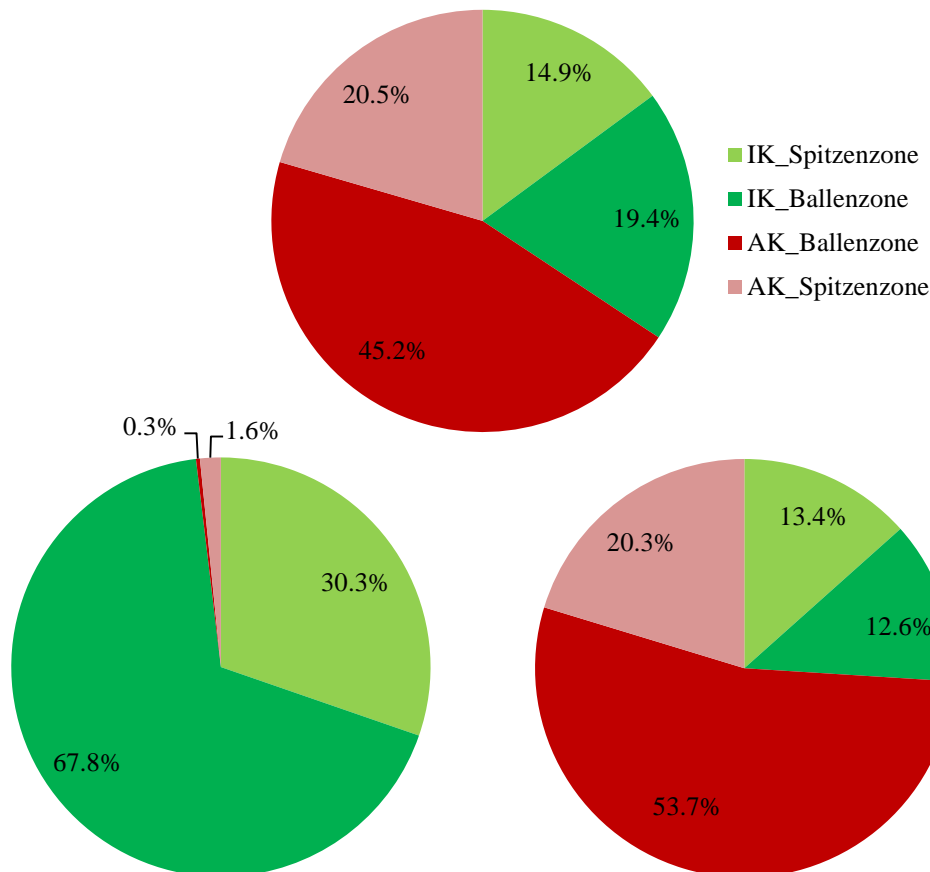


Abbildung 52: Vergleich der Kräfteverteilung (% , Mittelwerte) auf die Klauenzonen einer Hintergliedmasse bei der Ausgangssituation (oben im Bild) (Werte der linken und rechten Hintergliedmassen paarweise gemittelt) und der linken (unten links im Bild) respektive rechten (unten rechts im Bild) Hintergliedmasse bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K. 100 % = Gewichtskraft an einer Hintergliedmasse. AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

In allen Hauptzonen ausser in den Spitzenzonen der beiden Klauen der rechten Hintergliedmasse änderten sich von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin die Gewichtskräfte signifikant. An der Innenklaue der linken Hintergliedmasse wurden beide Hauptzonen bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant stärker belastet als bei der Ausgangssituation. Innerhalb dieser Klaue fand zudem eine Änderung des Lastverhältnisses zwischen den beiden Zonen statt, von einer eher ausgeglichenen Situation zu einer

Verteilung der Last im arithmetischen Mittel zu einem Drittel auf die Spitzenzone und zu zwei Dritteln auf die Ballenzone (Abb. 52). Die Ballenzone der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse blieb nicht nur die am stärksten belastete Klauenzone dieser Gliedmasse, sondern wurde auch noch signifikant stärker belastet, und zwar im Median um 21.3 % des Wertes der Ausgangssituation. Diese Kräftezunahme war bei drei Vierteln der Tiere zu finden. In der Ballenzone der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse fand bei 18 von 28 Tieren eine Kräfte- tereduktion statt.

6.5.2.2. *Flächen der Klauenabdrücke*

Die Abdruckflächen der Klauen der linken Hintergliedmasse+K und der rechten Hintergliedmasse waren signifikant unterschiedlich gross (Tab. 41). Und zwar war die Fläche der Klauenabdrücke der rechten Hintergliedmasse bei 22 von 28 Kühen und im Median um 24.6 % grösser als diejenige der linken Hintergliedmasse+K.

Ebenfalls signifikant unterschieden sich an beiden Hintergliedmassen die Abdruckflächen zwischen Aussen- und Innenklaue sowie je zwischen den beiden Aussen- und den beiden Innenklauen. An der linken Hintergliedmasse+K fiel der Unterschied in der Klauenabdruckfläche zwischen den beiden Klauen aufgrund der Tatsache, dass die Aussenklaue beinahe vollständig vom Untergrund abgehoben war (bei 5 von 28 Tieren hatte sie keinen Bodenkontakt mehr), sehr deutlich aus: Der Abdruckflächenmittelwert dieser Aussenklaue betrug 6.0 % desjenigen ihrer Partnerklaue mit dem Kothurn. An der rechten Hintergliedmasse hingegen hatte die Aussenklaue beim Vergleich der Mittelwerte eine mehr als eineinhalbfach so grosse Abdruckfläche wie die Innenklaue. Die Abdruckfläche der mit einem Kothurn erhöhten Innenklaue der linken Hintergliedmasse war auch signifikant unterschiedlich zu derjenigen der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse, und zwar war sie bei 24 von 28 Tieren an der Innenklaue+K grösser. Die Abdruckfläche dieser Innenklaue+K zeigte eine Spannweite zwischen 39.9 cm^2 und 79.6 cm^2 . An der entlasteten Aussenklaue der linken Hintergliedmasse lagen die Abdruckflächen in einem Bereich zwischen 0 cm^2 und 12.2 cm^2 . An den Klauen der rechten Hintergliedmasse massen die Abdruckflächen der Aussenklauen zwischen 35.2 cm^2 und 67.1 cm^2 und diejenigen der Innenklaue zwischen 15.9 cm^2 und 52.6 cm^2 .

Tabelle 41: Abdruckflächen (in cm²) und Flächenanteile (in %) an der linken und rechten Hintergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke Hintergliedmasse | | | | Rechte Hintergliedmasse | | | |
|----------------------------------|---|---|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | 63.3 (12.4) * ¹ | | | | 76.8 (13.9) * ¹ | | | |
| <i>Anteil (%) an beiden HGLM</i> | 45.2 | | | | 54.8 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | 3.6 (3.5) | | 59.7 (10.5) * ^{2,5,6} | | 29.4 (9.2) * ^{3,5} | | 47.5 (8.2) * ^{3,4,6} | |
| | $\tilde{x} = 2.6$ (Min = 0.0, Max = 12.2) * ^{2,4} | | | | | | | |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 5.7 | | 94.3 | | 38.2 | | 61.8 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 3.1 (3.4) | 0.5 (1.0) | 23.2 | 36.5 | 14.6 | 14.8 | 18.6 | 28.9 |
| | * ^{7,10} | $\tilde{x} = 0.0$ (Min = 0.0, Max = 4.7) * ^{7,11} | (6.9) * ^{8,12} | (8.1) * ^{8,13} | (3.3) * ¹² | (7.7) * ¹³ | (3.4) * ^{9,10} | (5.9) * ^{9,11} |
| <i>Anteil (%) an einer Klaue</i> | 85.7 | 14.3 | 30.9 | 69.1 | 51.5 | 48.5 | 27.4 | 72.6 |
| <i>Anteil (%) an einer HGLM</i> | 1.6 | 0.3 | 30.3 | 67.8 | 13.4 | 12.6 | 20.3 | 53.7 |

HGLM = Hintergliedmasse. SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Klauenzonen mit den grössten Abdruckflächen innerhalb einer Gliedmasse waren bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K die Ballenzone der Innenklaue+K sowie die Ballenzone der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse. Die Abdruckflächen der Spitzenzonen waren hier jeweils signifikant kleiner als diejenigen der Ballenzonen. An der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse war das Verhältnis der Abdruckflächen von Spitzen- und Ballenzone umgekehrt: Dort besass die Spitzenzone eine signifikant grössere Abdruckfläche als die Ballenzone. Dagegen fand sich bei den Abdruckflächen der beiden Hauptzonen an der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse kein signifikanter Unterschied.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin war an beiden Hintergliedmassen beim Vergleich der Klauenabdruckflächen eine signifikante Flächenabnahme festzustellen (Tab. 42). Diese fand bei jeweils einer Mehrheit der Tiere statt (bei 25 von 28 an der linken respektive bei 17 von 28 an der rechten Hintergliedmasse).

Tabelle 42: Vergleich der Klauenabdruckflächen (in cm²) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Hintergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Hintergliedmasse | | | |
|----------|---|---------------------------|----------------------------|----------------|---|-----------------|--------------------|------------|
| A | 81.0 (11.9) | | | | 81.0 (11.9) | | | |
| | $\tilde{x} = 81.1$ (Min = 60.4, Max = 118.1) * ¹ | | | | $\tilde{x} = 81.1$ (Min = 60.4, Max = 118.1) * ² | | | |
| M | 63.3 (12.4) * ¹ | | | | 79.8 (13.9) * ² | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 47.6 (6.8) * ³ | | 33.3 (7.8) * ⁴ | | 33.3 (7.8) * ⁵ | | 47.6 (6.8) | |
| M | 3.6 (3.5) | | 59.7 (10.5) * ⁴ | | 29.4 (9.2) * ⁵ | | 47.5 (8.2) | |
| | $\tilde{x} = 2.6$ | | | | | | | |
| | (Min = 0.0, Max = 12.2) * ³ | | | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 19.0 (3.1) | 28.6 (4.7) | 14.6 (3.5) | 18.8 (6.0) | 14.6 (3.5) | 18.8 (6.0) | 19.0 (3.1) | 28.6 (4.7) |
| | * ⁶ | * ⁷ | * ⁸ | * ⁹ | $\tilde{x} = 15.0$ | * ¹⁰ | | |
| | | | | | (Min = 5.5, Max = 19.6) | | | |
| M | 3.1 (3.4) * ⁶ | 0.5 (1.0) | 23.2 (6.9) | 36.5 (8.1) | 14.6 (3.3) | 14.8 (7.7) | 18.6 (3.4) | 28.9 (5.9) |
| | | $\tilde{x} = 0.0$ | * ⁸ | * ⁹ | | * ¹⁰ | | |
| | | (Min = 0.0, Max = 4.7) | | | | | | |
| | | * ⁷ | | | | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. + = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Auch die Abdruckfläche der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse wurde bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K im Vergleich zur Ausgangssituation bei allen 28 Tieren kleiner und insgesamt signifikant kleiner (Abnahme im Median um 94.3 % des Wertes der

Ausgangssituation). Dafür nahm die Abdruckfläche der Innenklaue+K signifikant zu (Zunahme bei allen 28 Tieren und im Median um 89.6 %). An der rechten Hintergliedmasse veränderte sich die Aussenklaue flächenmässig nicht signifikant, während die Innenklaue bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K eine signifikant kleinere Abdruckfläche (Abnahme bei 17 von 28 Tieren) als bei der Ausgangssituation vorwies. Deren Fläche nahm im Median allerdings nur um 4.6 % des Wertes der Ausgangssituation ab.

Was die Klauenzonen betrifft, hatte bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K die Ballenzone der Aussenklaue an der linken Hintergliedmasse eine zur Spitzenzone verhältnismässig viel kleinere Abdruckfläche als bei der Ausgangssituation. Die Abdruckfläche der Spitzenzone der Innenklaue+K vergrösserte sich im Median um mehr als die Hälfte (das heisst genau um plus 57.7 %) und diejenige der Ballenzone beinahe auf das Doppelte (das heisst genau um plus 98.3 %) im Vergleich zu den Werten der Ausgangssituation. An der rechten Hintergliedmasse wurde die Abdruckfläche der Ballenzone der Innenklaue bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant kleiner (Abnahme im Median um 7.6 %) und näherte sich der Abdruckfläche der Spitzenzone an; an den beiden Hauptzonen der Aussenklaue gab es keine signifikanten Flächenänderungen.

6.5.2.3. *Mittlere Drücke*

Die mittleren Drücke auf dem Gliedmassenlevel unterschieden sich bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K nicht signifikant (Tab. 43). Allerdings zeigte sich beim Vergleich der beiden Druck-Mittelwerte von linker Hintergliedmasse+K und rechter Hintergliedmasse eine Tendenz zu einem grösseren mittleren Druck an der linken. So war der mittlere Druck auch bei einer Mehrheit der Tiere, bei 16 von 28, an der linken Hintergliedmasse+K grösser als an der rechten Hintergliedmasse.

Sowohl an der linken Hintergliedmasse+K als auch an der rechten Hintergliedmasse unterschieden sich die mittleren Drücke zwischen Aussen- und Innenklaue signifikant. Auch der Vergleich der mittleren Drücke an beiden Aussenklauen und an beiden Innenklauen ergab signifikante Unterschiede. An der linken Hintergliedmasse war der mittlere Druck unter dem Kothurn an der Innenklaue bei allen 28 Tieren und beim Vergleich der Mittelwerte um das Vierfache grösser als derjenige an der Aussenklaue. An der rechten Hintergliedmasse war der signifikant grössere Druck an der Aussenklaue zu finden: Der Mittelwert an der Aussenklaue

war beinahe doppelt so gross wie derjenige an der Innenklaue. Bei 26 von 28 Tieren war der mittlere Druck an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse grösser als an der Innenklaue. Im Vergleich zum mittleren Druck unter dem Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse war derjenige an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse beinahe gleich gross.

Tabelle 43: Mittlere Drücke (in kPa) an der linken und rechten Hintergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke Hintergliedmasse | | | | Rechte Hintergliedmasse | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|--|-----------------|-------------------------------|------------------|
| 212.9 (55.5) | | | | 195.6 (47.2) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| 55.1 (33.6) | | 221.5 (60.2) * ^{1,4} | | 128.1 (37.8) | | 232.3 (68.9) * ^{2,3} | |
| $\tilde{x} = 44.7$ | | | | $\tilde{x} = 127.3$ kPa | | | |
| (Min = 0.0, Max = 158.0) * ^{1,3} | | | | (Min = 67.4, Max = 237.5) * ^{2,4} | | | |
| SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| 54.5 (29.6) | 65.2 (116.3) | 159.1 (64.8) | 254.0 (88.6) | 132.5 (45.5) | 107.1 (57.3) | 160.1 (60.7) | 272.6 (99.6) |
| * ⁷ | $\tilde{x} = 0.0$ | * ^{5,9} | * ^{5,10} | $\tilde{x} = 126.8$ | * ¹⁰ | * ^{6,7} | * ^{6,8} |
| | (Min = 0.0, Max = 427.3) | | | (Min = 42.7, Max = 311.4) | | | |
| | * ⁸ | | | * ⁹ | | | |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

An den beiden stärker belasteten Klauen, der Innenklaue+K der linken sowie der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse, wies die Ballenzone einen signifikant grösseren mittleren Druck auf als die Spitzenzone.

Vergleich mit der Ausgangssituation

An der linken Hintergliedmasse+K war der mittlere Druck signifikant grösser als in der Ausgangssituation, an der rechten hingegen knapp nicht (Tab. 44). An beiden Gliedmassen aber wurde der mittlere Druck durch das Anbringen des Kothurns bei einer Mehrheit der Tiere (an

der linken Hintergliedmasse bei 20, an der rechten bei 17 von 28) und auch im Median grösser (an der linken Hintergliedmasse um 18.4 % und an der rechten um 4.6 %).

Tabelle 44: Vergleich der mittleren Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Hintergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Hintergliedmasse | | | |
|----------|---|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| A | 179.5 (24.0) | | | | 179.5 (24.0) | | | |
| | $\tilde{x} = 184.4$ (Min = 121.6, Max = 219.2) * ¹ | | | | $\tilde{x} = 184.4$ (Min = 121.6, Max = 219.2) | | | |
| M | 212.9 (55.5) * ¹ | | | | 195.6 (47.2) | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 200.0 (41.8) * ² | | 144.8 (37.5) * ³ | | 144.8 (37.5) | | 200.0 (41.8) * ⁴ | |
| M | 55.1 (33.6) | | 221.5 (60.2) * ³ | | 128.1 (37.8) | | 232.3 (68.9) * ⁴ | |
| | $\tilde{x} = 44.7$ | | | | $\tilde{x} = 127.3$ | | | |
| | (Min = 0.0, Max = 158.0) * ² | | | | (Min = 67.4, Max = 237.5) | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 154.9 | 226.9 | 139.3 | 138.6 | 139.3 | 138.6 | 154.9 | 226.9 |
| | (41.1) * ⁵ | (59.1) * ⁶ | (45.3) * ⁷ | (58.5) * ⁸ | (45.3) | (58.5) * ⁹ | (41.1) | (59.1) * ¹⁰ |
| M | 54.5 (29.6) | 65.2 (116.3) | 159.1 | 254.0 (88.6) | 132.5 | 107.1 (57.3) | 160.1 (60.7) | 272.6 |
| | * ⁵ | $\tilde{x} = 0.0$ | (64.8) * ⁷ | * ⁸ | (45.5) | * ⁹ | | (99.6) * ¹⁰ |
| | | (Min = 0.0, | | | $\tilde{x} = 126.8$ | | | |
| | | Max = 427.3) | | | (Min = 42.7, | | | |
| | | * ⁶ | | | Max = 311.4) | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. + = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Hintergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

An drei Klauen der Hintergliedmassen wies der mittlere Druck bei der Ausgangs- und bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant unterschiedliche Werte auf. Unter dem Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse nahm der mittlere Druck bei 26 von 28 Tieren und im Median um 51.6 % und an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse bei 21 von 28 Tieren und im Median um 13.5 % zu. An der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse nahm der mittlere Druck bei allen 28 Tieren ab, und zwar im Median um 80.2 %. Die Innenklaue der rechten Hintergliedmasse wies bei 18 von 28 Tieren einen kleineren mittleren Druck auf und die Aussenklaue bei 21 von 28 Tieren einen grösseren. Insgesamt waren

die mittleren Drücke von Aussen- und Innenklauen an beiden Gliedmassen bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K stärker divergierend als bei der Ausgangssituation.

An der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse wurde der mittlere Druck in beiden Hauptzonen signifikant kleiner (Abnahme in der Spitzenzone bei allen 28 Tieren und im Median um 79.4 %, in der Ballenzone bei 27 von 28 Tieren und im Median um 100.0 %), unter dem Kothurn an deren Innenklaue in beiden Zonen signifikant grösser (Zunahme in der Spitzenzone bei 20 von 28 Tieren und im Median um 17.4 %, in der Ballenzone bei 24 von 28 Tieren und im Median um 83.8 %). In der Ballenzone der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse stieg der mittlere Druck signifikant an (Zunahme bei 21 von 28 Tieren und im Median um 15.0 %), während er in der Ballenzone der Innenklaue an dieser Gliedmasse signifikant abnahm (Abnahme bei 18 von 28 Tieren und im Median um 24.4 %). Im Gegensatz zur Ausgangssituation, in der der mittlere Druck in Spitzen- und Ballenzone der Innenklauen beinahe gleich hoch war, wies in der Messsituation linke Hintergliedmasse+K die Ballenzone der Innenklaue+K und die Spitzenzone der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse den jeweils grösseren mittleren Druck auf.

6.5.2.4. *Maximale Drücke*

Die Maximaldrücke an linker Hintergliedmasse+K und rechter Hintergliedmasse waren nicht signifikant unterschiedlich (Tab. 45). Bei einer knappen Mehrheit der Tiere, bei 15 von 28, und auch beim Vergleich der beiden Maximaldruck-Mittelwerte war an der rechten Hintergliedmasse ein grösserer Maximaldruck zu messen als an der linken.

Bei allen 28 Tieren war der Maximaldruck innerhalb der linken Hintergliedmasse unter dem Kothurn an der Innenklaue grösser als an der Aussenklaue. Der Maximaldruck-Mittelwert der Aussenklaue betrug nur etwas mehr als einen Zehntel desjenigen an der Innenklaue+K. An der rechten Hintergliedmasse wurde bei 25 von 28 Tieren unter der Aussenklaue ein grösserer Maximaldruck gemessen als an der Innenklaue. Der Maximaldruck-Mittelwert der Aussenklaue war hier fast doppelt so gross wie derjenige an der Innenklaue. Damit unterschieden sich die Maximaldrücke von Aussen- und Innenklaue innerhalb beider einzelnen Hintergliedmassen sowie zwischen beiden Aussen- und beiden Innenklauen jeweils signifikant, die beiden hohen Maximaldrücke an der Innenklaue+K der linken und an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse hingegen nicht.

Tabelle 45: Maximale Drücke (in kPa) an der linken und rechten Hintergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| Linke Hintergliedmasse | | | | Rechte Hintergliedmasse | | | |
|-----------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|---|--|-----------------------------------|------------------------------------|
| 967.1 (290.1) | | | | 1116.4 (322.2) | | | |
| Aussenklaue | | Innenklaue (Kothurn) | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| 108.9 (115.5) * ^{1,3} | | 967.1 (290.1) * ^{1,4} | | 581.6 (218.3) | | 1091.5 (336.9) * ^{2,3} | |
| | | | | $\tilde{x} = 528.6$ (Min = 315.2, Max = 1239.5) * ^{2,4} | | | |
| SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| 105.0 (116.0) * ^{5,8} | 29.9 (62.5) $\tilde{x} = 0.9$ kPa (Min = 0.0, Max = 288.0) * ^{5,9} | 693.0 (273.4) * ^{6,10} | 943.1 (286.4) * ^{6,11} | 466.6 (193.9) | 412.5 ($\sigma = 252.1$) * ¹¹ | 603.3 (221.0) * ^{7,8} | 1055.3 (357.2) * ^{7,9} |
| | | | | $\tilde{x} = 445.4$ (Min = 99.9, Max = 1239.5) * ¹⁰ | | | |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Ausser an der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse waren die Maximaldrücke zwischen Spitzen- und Ballenzone innerhalb einer Klaue jeweils signifikant unterschiedlich: An der Innenklaue+K der linken und an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse war in der Ballenzone ein signifikant grösserer Maximaldruck zu finden als in der Spitzenzone; an der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse war es umgekehrt.

Die Verteilung der Maximaldrücke auf die vier Haupt- und drei Grenzzonen bei allen Messungen (insgesamt 98) der 28 linken Hintergliedmasse+K und der 28 rechten Hintergliedmassen ist den folgenden Kreisdiagrammen zu entnehmen (Abb. 53):

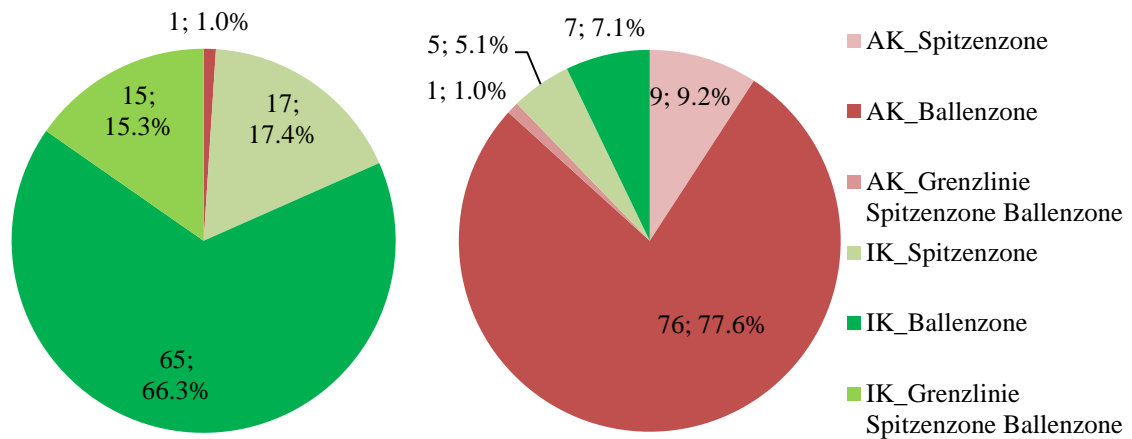


Abbildung 53: Absolute und relative Häufigkeit der Lage des Maximaldruckes in den unterschiedlichen Klauenzonen bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Zonen mit Maximaldruck an den Klauen der linken (links im Bild) und rechten Hintergliedmasse (rechts im Bild) ausgezählt (100 % = je 98 Messungen). AK = Aussenklaue, IK = Innenklaue.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Der Maximaldruck an der linken Hintergliedmasse unterschied sich zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K nicht signifikant (Tab. 46). Bei ungefähr je einer Hälfte der Tiere fand eine Abnahme oder eine Zunahme im Maximaldruck statt. An der rechten Hintergliedmasse war hingegen bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K eine signifikante Zunahme des maximalen Drucks (bei 17 von 28 Kühen) (im Median um 13.7 % des Wertes der Ausgangssituation) festzustellen im Vergleich zur Ausgangssituation.

Tabelle 46: Vergleich der maximalen Drücke (in kPa) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Hintergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Hintergliedmasse | | | |
|---|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| A | 1003.8 (267.6) | | | | 1003.8 (267.6) * ¹ | | | |
| M | 967.1 (290.1) | | | | 1116.4 (322.2) * ¹ | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 965.9 (282.0) * ² | | 637.4 (181.6) * ³ | | 637.4 (181.6) | | 965.9 (282.0) * ⁴ | |
| M | 108.9 (115.5) * ² | | 967.1 (290.1) * ³ | | 581.6 (218.3) | | 1091.5 (336.9) * ⁴ | |
| | $\tilde{x} = 528.6$ (Min = 315.2, Max = 1239.5) | | | | | | | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 578.8 (172.9) * ⁵ | 939.2 (299.5) * ⁶ | 507.9 (186.6) * ⁷ | 547.0 (209.4) * ⁸ | 507.9 (186.6) | 547.0 (209.4) * ⁹ | 578.8 (172.9) | 939.2 (299.5) * ¹⁰ |
| M | 105.0 (116.0) * ⁵ | 29.9 (62.5) | 693.0 (273.4) * ⁷ | 943.1 (286.4) * ⁸ | 466.6 (193.9) | 412.5 (252.1) * ⁹ | 603.3 (221.0) | 1055.3 (357.2) * ¹⁰ |
| | $\tilde{x} = 0.9$ (Min = 0.0, Max = 288.0) * ⁶ | | | | $\tilde{x} = 445.4$ (Min = 99.9, Max = 1239. 5) | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ = Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Hintergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Auf Klauenlevel unterschieden sich die maximalen Drücke zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K an allen Klauen ausser an der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse signifikant. An der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse fand bei allen 28 Tieren eine Reduktion des Maximaldruckes statt (im Median um 93.8 %). Dafür nahm der Maximaldruck unter dem Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse bei 26 von 28 Tieren zu, und zwar im Median um 52.8 %. Auch an der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse gab es im Median einen Anstieg des maximalen Drucks – allerdings einen kleineren –, und zwar um 11.6 %. Zugunommen hatte der Maximaldruck dort bei 18 von 28 Tieren. An der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse nahm der maximale Druck bei je einer Hälfte der Tiere zu oder ab. Insgesamt vergrösserte sich nicht nur innerhalb der linken, sondern auch

innerhalb der rechten Hintergliedmasse der Unterschied der Maximaldruck-Mittelwerte zwischen Aussen- und Innenklaue, an der linken Hintergliedmasse zulasten der Innenklaue+K, an der rechten zulasten der Aussenklaue.

Auch die Häufigkeit, mit welcher der Maximaldruck an den einzelnen Hintergliedmassen an Aussen- oder Innenklaue lokalisiert war, änderte sich von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin: An der linken Hintergliedmasse war der Maximaldruck häufiger an der Innenklaue (bei 97 von 98 Messungen [99.0 %] versus bei 13 von 56 Messungen [23.3 %]), an der rechten häufiger an der Aussenklaue (bei 86 von 98 Messungen [87.8 %] versus bei 43 von 56 Messungen [76.7 %]) zu finden.

Auf Klauenzonenlevel nahm der maximale Druck in den Hauptzonen der Aussenklaue der linken Hintergliedmasse signifikant ab, in denen der Innenklaue+K signifikant zu (in der Ballenzone stärker als in der Spitzenzone). Weiter war der Maximaldruck in der Ballenzone der Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse signifikant höher und in der Ballenzone der Innenklaue derselben Gliedmasse signifikant niedriger als in der Ausgangssituation.

6.5.2.5. Abstände zwischen den Schwerpunkten der einzelnen Hintergliedmassen und dem Schwerpunkt beider Hintergliedmassen, Spurbreite und Vor-Rück-Beinabstand

Die Abstände zwischen den Schwerpunkten der linken und rechten Hintergliedmasse zum Gliedmassenpaarschwerpunkt unterschieden sich in x-Richtung nicht signifikant: Bei einer Mehrheit der Tiere (bei 17 von 28) und beim Vergleich der beiden Mittelwerte ($\mu_L = 14.0$ cm, $\sigma = 4.6$; $\mu_R = 12.6$, $\sigma = 4.1$) war jedoch ein kleinerer Abstand zwischen dem rechten Gliedmassenschwerpunkt und dem Schwerpunkt beider Gliedmassen feststellbar als auf der linken Seite (Abb. 54). So sprach auch das Verhältnis der beiden Abstands-Mittelwerte in x-Richtung von 52.6 % (links) zu 47.4 % (rechts) für einen leicht grösseren Abstand links respektive einen leicht kleineren rechts. Dieses wiederum hing direkt mit der Lastverteilung auf die beiden Gliedmassen zusammen, welche 47.3 % (links) zu 52.7% (rechts) betrug (Korrelation nach Spearman: $r = -0.998^{**}$).

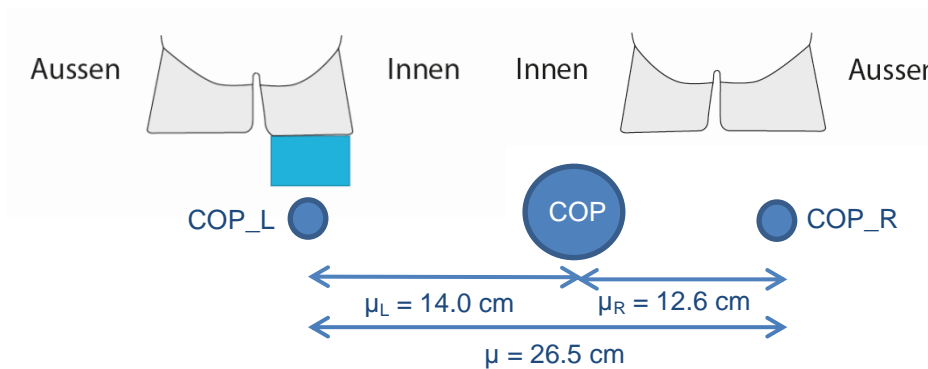


Abbildung 54: Schematische Darstellung der arithmetischen Mittelwerte (μ) der Abstände der einzelnen Gliedmassenschwerpunkte (COP_L, COP_R) zum Gliedmassenpaarschwerpunkt (COP) in x-Richtung und der Spurbreite der Hintergliedmassen bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K.

In y-Richtung gab es hingegen einen signifikanten Unterschied zwischen den Abständen der linken und rechten Gliedmassenschwerpunkte zum Gliedmassenpaarschwerpunkt ($\mu_L = 3.2 \text{ cm}$, $\sigma = 2.1$; $\mu_R = 2.5$, $\sigma = 1.2$). Bei einer Mehrheit der Messungen (bei 65 von 98 Messungen) war die linke Hintergliedmasse+K weiter kranial platziert als die rechte. Bei 6 Messungen standen die beiden Gliedmassen ungefähr parallel zueinander. Die Spurbreite der Hintergliedmassen betrug im arithmetischen Mittel 26.5 cm ($\sigma = 6.4$) und der Vor-Rück-Beinabstand 5.7 cm ($\sigma = 3.0$).

Die Gewichtskräfte an den Aussenklauen beider Hintergliedmassen waren mit zunehmender Spurbreite tendenziell kleiner (linke Hintergliedmasse Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = -0.169$, rechte Hintergliedmasse Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = -0.153$). An der Innenklaue+K der linken Hintergliedmasse gab es keine gerichtete, gemeinsame Veränderung von Gewichtskraft und Spurbreite, an der Innenklaue der rechten Hintergliedmasse hingegen schon: Dort war eine mit mittlerem bis starkem Effekt positive Korrelation der Gewichtskraft mit der Spurbreite festzustellen (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.443$ *). Dies bedeutet, dass mit zunehmendem Gliedmassenabstand die Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse tendenziell entlastet und dafür die Innenklaue mehr belastet wurde.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Beide Abstände der Gliedmassenschwerpunkte zum Gliedmassenpaarschwerpunkt in x-Richtung sowie die Spurbreite waren bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K jeweils bei einer Mehrheit der Tiere kleiner und insgesamt signifikant kleiner als bei der Ausgangssituation. Der Abstand des Gliedmassepaarschwerpunktes zum Schwerpunkt der rechten Hintergliedmasse in x-Richtung nahm stärker ab als derjenige zur linken Hintergliedmasse+K (bei linker Hintergliedmasse prozentuale Reduktion im Median um 10.5 %, bei rechter um 25.6 %). Der Vor-Rück-Beinabstand nahm hingegen signifikant zu. Sowohl für die linke als auch für die rechte Hintergliedmasse war eine Zunahme der Abstände der Gliedmassenschwerpunkte zum Gliedmassenpaarschwerpunkt in y-Richtung festzustellen. An der linken Hintergliedmasse+K war diese grösser (im Median Zunahme um 45.0 %) als an der rechten (im Median Zunahme um 32.8 %). Bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K war die linke Hintergliedmasse häufiger weiter kranial platziert als bei der Ausgangssituation (bei 65 von 98 Messungen [66.3 %] versus bei 11 von 28 Messungen [39.3 %]). Die beiden Hintergliedmassen rückten also in x-Richtung näher zusammen (Reduktion rechts mehr als links), wichen aber in y-Richtung mehr voneinander ab (Zunahme links mehr als rechts).

6.5.2.6. Zusammenfassung Messsituation linke Hintergliedmasse+K (Hintergliedmassen)

Mit einem Kothurn an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse wurden bei den meisten Tieren und bei Betrachtung der Mittelwerte die grössten Werte für Gewichtskraft, Klauenabdruckfläche, mittleren sowie maximalen Druck an der linken Hintergliedmasse unter dem Kothurn an der Innenklaue und in dessen Ballenzone und an der rechten Hintergliedmasse an der Aussenklaue und ebenfalls in deren Ballenzone gemessen (Abb. 55).

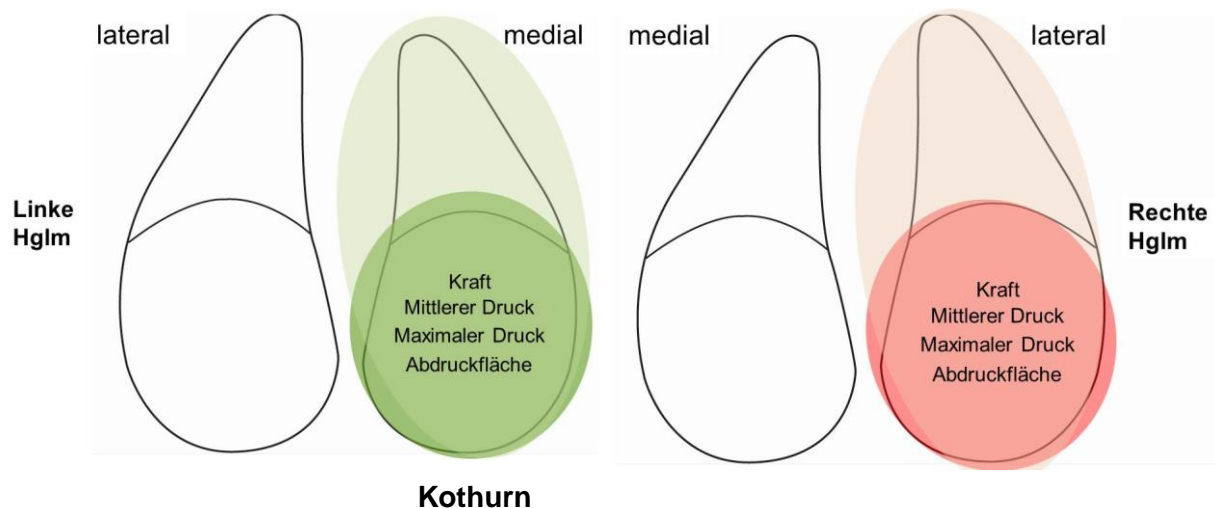


Abbildung 55: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an der linken und rechten Hintergliedmasse (Hglm), Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Darstellung anhand des arithmetischen Mittelwerts und der Mehrheit der Tiere (rot = Aussenklaue, grün = Innenklaue).

Im Vergleich zur Ausgangssituation wurde die Aussenklaue an der linken Hintergliedmasse durch den Kothurn an der dortigen Innenklaue signifikant weniger und die Innenklaue+K dafür signifikant mehr belastet. Letztere trug nahezu das gesamte Gewicht, das auf der linken Gliedmasse lastete. An der rechten Hintergliedmasse wurde die Aussenklaue bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant mehr und die Innenklaue signifikant weniger belastet. Ein vollständiges Bild aller Veränderungen der vier Haupt-Messparameter von der Ausgangs- zur Messsituation mit Kothurn hin liefert Abbildung 61 im Anhang.

6.5.3. Messwerte für die Vordergliedmassen

Im Folgenden werden Auswirkungen eines Kothurns an der Innenklaue der linken Hintergliedmasse auf die Belastung der Vordergliedmassen dargestellt. Die Gewichtskräfte werden wiederum im Detail, die übrigen Parameter (Abdruckfläche und Drücke) in einer Zusammenfassung präsentiert.

6.5.3.1. Gewichtskräfte

Auf die linke Vordergliedmasse fiel bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K – berechnet aus den Mittelwerten der Gewichtskräfte – mit 53.0 % der Gliedmassenpaarlast der grössere Gewichtskraftanteil als auf die rechte Vordergliedmasse. Die Kräfte an den beiden Gliedmassen waren signifikant unterschiedlich (Tab. 47).

Tabelle 47: Gewichtskräfte (in N) und Kraftanteile (in %) an linker und rechter Vordergliedmasse, an den Aussen- und Innenklauen sowie deren Spitzen- und Ballenzonen, Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke Vordergliedmasse | | | | Rechte Vordergliedmasse | | | |
|---|-------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------|
| | 1674.7 (274.1) * ¹ | | | | 1483.6 (241.7) * ¹ | | | |
| <i>Anteil an beiden VGLM</i> | 53.0 | | | | 47.0 | | | |
| <i>Anteil an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 28.1 | | | | 24.9 | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| | 631.8 (351.8) * ² | | 1042.8 (296.1) * ² | | 1030.2 (244.4) * ³ | | 453.4 (265.1) * ³ | |
| <i>Anteil an einer VGLM</i> | 37.7 | | 62.3 | | 69.4 | | 30.6 | |
| <i>Anteil an beiden VGLM</i> | 20.0 | | 33.0 | | 32.6 | | 14.4 | |
| <i>Anteil an vier Gliedmassen (auf 15 Kühe bezogen)</i> | 10.6 | | 17.5 | | 17.3 | | 7.6 | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| | 267.1 (120.0) | 364.8 (283.2) | 233.2 (89.3) | 809.7 (288.2) * ⁴ | 228.0 (91.2) * ⁵ | 802.2 (215.7) * ⁵ | 224.8 (128.6) | 228.6 (210.9) |
| | | \tilde{x} = | | \tilde{x} = | | | | |
| | | 335.5 | | 222.9 | | | | |
| | | (Min = | | (Min = | | | | |
| | | 9.3, | | 78.4, | | | | |
| | | Max = | | Max = | | | | |
| | | 1173.3) | | 601.0) * ⁴ | | | | |
| <i>Anteil an einer Klaue</i> | 42.3 | 57.7 | 22.4 | 77.6 | 22.1 | 77.9 | 49.6 | 50.4 |
| <i>Anteil an einer VGLM</i> | 16.0 | 21.8 | 13.9 | 48.3 | 15.4 | 54.1 | 15.1 | 15.4 |

SPZ = Spitzenzone. BZ = Ballenzone. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Die Gewichtskräfte an den Innenklauen waren bei beiden Vordergliedmassen signifikant grösser als diejenigen an den Aussenklauen. An der rechten Vordergliedmasse waren die Kräfte der beiden Einzelklauen stärker divergierend als an der linken, jedoch waren weder die

beiden kontralateralen Aussen- noch die beiden kontralateralen Innenklauen signifikant unterschiedlich belastet. Innerhalb der Innenklauen der beiden Vordergliedmassen waren die Kräfte in Spitzen- und Ballenzone jeweils signifikant unterschiedlich (grösser in den Ballenzonen), innerhalb der Aussenklauen nicht.

Vergleich mit der Ausgangssituation

Im Vergleich mit der Ausgangssituation wurde die rechte Vordergliedmasse bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant geringer belastet (Kräfte-reduktion bei 17 von 28 Tieren und im Median um 4.6 %) (Tab. 48). An der linken Vordergliedmasse war kein signifikanter Kräfteunterschied festzustellen, allerdings nahm die Gewichtskraft bei einer Mehrheit der Tiere (bei 18 von 28) von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hinzu.

Auf Klauenebene waren bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K wie schon bei der Ausgangssituation die Innenklauen die jeweils stärker belasteten Klauen. An der linken Vordergliedmasse wurde die (im Vergleich zur Ausgangssituation) mehrheitlich zusätzlich vorhandene Gewichtskraft allerdings mehr von der Aussenklaue als von der Innenklaue übernommen: So war an der dortigen Aussenklaue eine signifikante Kräftezunahme zu finden (Kräftezunahme bei 20 von 28 Tieren und im Median um 18.7 %). An den restlichen drei Klauen der Vordergliedmassen unterschieden sich die Gewichtskräfte zwischen der Ausgangs- und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K nicht signifikant. Bei jeweils einer Mehrheit der Tiere war allerdings in der Messsituation linke Hintergliedmasse+K eine Kräfteabnahme an der Innenklaue der linken (bei 16 von 28) und rechten Vordergliedmasse (bei 18 von 28) festzustellen im Vergleich zur Ausgangssituation.

Tabelle 48: Vergleich der Gewichtskräfte (in N) bei der Ausgangssituation A und der Messsituation M linke Hintergliedmasse+K. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ), bei nicht normalverteilten Daten zusätzlich Median (\tilde{x}), Minimum (Min) sowie Maximum (Max).

| | Linke ⁺ Vordergliedmasse | | | | Rechte ⁺ Vordergliedmasse | | | |
|----------|---|---|--|------------------|--|------------------|--|---|
| A | 1599.8 (159.9) | | | | 1599.8 (159.9) * ¹ | | | |
| M | 1674.7 (274.1) | | | | 1483.6 (241.7) * ¹ | | | |
| | Aussenklaue | | Innenklaue | | Innenklaue | | Aussenklaue | |
| A | 478.6 (247.1) | | 1121.2 (206.8) | | 1121.2 (206.8) | | 478.6 (247.1) | |
| | $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) * ² | | | | | | $\tilde{x} = 511.6$ (Min = 103.6, Max = 845.8) | |
| M | 631.8 (351.8) * ² | | 1042.8 (296.1) | | 1030.2 (244.4) | | 453.4 (265.1) | |
| | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ | SPZ | BZ |
| A | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) | 257.9 (111.8) | 863.3 (170.7) | 228.2 (105.1) | 250.4 (189.8) |
| | $\tilde{x} = 201.8$ (Min = 86.2, Max = 468.4) | $\tilde{x} = 231.3$ (Min = 0.6, Max = 576.7) | $\tilde{x} = 243.8$ (Min = 84.4, Max = 651.5) | | $\tilde{x} = 243.8$ (Min = 84.4, Max = 651.5) | | $\tilde{x} = 201.8$ (Min = 86.2, Max = 468.4) | $\tilde{x} = 231.3$ (Min = 0.6, Max = 576.7) |
| | * ³ | | | | | | | |
| M | 267.1 (120.0) | 364.8 (283.2) | 233.2 (89.3) | 809.7 (288.2) | 228.0 (91.2) | 802.2 (215.7) | 224.8 (128.6) | 228.6 (210.9) |
| | | $\tilde{x} = 335.5$ (Min = 9.3, Max = 1173.3) * ³ | $\tilde{x} = 222.9$ (Min = 78.4, Max = 601.0) | | | | | |

SPZ = Spitzenzone, BZ = Ballenzone. ⁺ Bei Ausgangssituation Werte der linken und rechten Vordergliedmassen paarweise gemittelt. * = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich (parametrisch) respektive Vergleich der zentralen Tendenz (nicht parametrisch) zwischen A und M (zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten).

Innerhalb der stärker belasteten Aussenklaue der linken Vordergliedmasse wurde bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K in der Ballenzone eine signifikant grössere Kraft (Zunahme im Median um 31.3 %) im Vergleich zur Ausgangssituation gemessen. Bei allen anderen Kräften auf Klauenzonenlevel waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Messsituationen festzustellen.

6.5.3.2. Zusammenfassung Messsituation linke Hintergliedmasse+K (Vordergliedmassen)

Bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K waren an den Innenklauen beider Vordergliedmassen und dort in deren Ballenzonen wie schon bei der Ausgangssituation immer noch bei einer Mehrheit der Tiere und beim Vergleich der Mittelwerte die grösste Gewichtskraft, die grösste Klauenabdruckfläche und auch der grösste mittlere und maximale Druck innerhalb linker oder rechter Vordergliedmasse zu finden (Abb. 56).

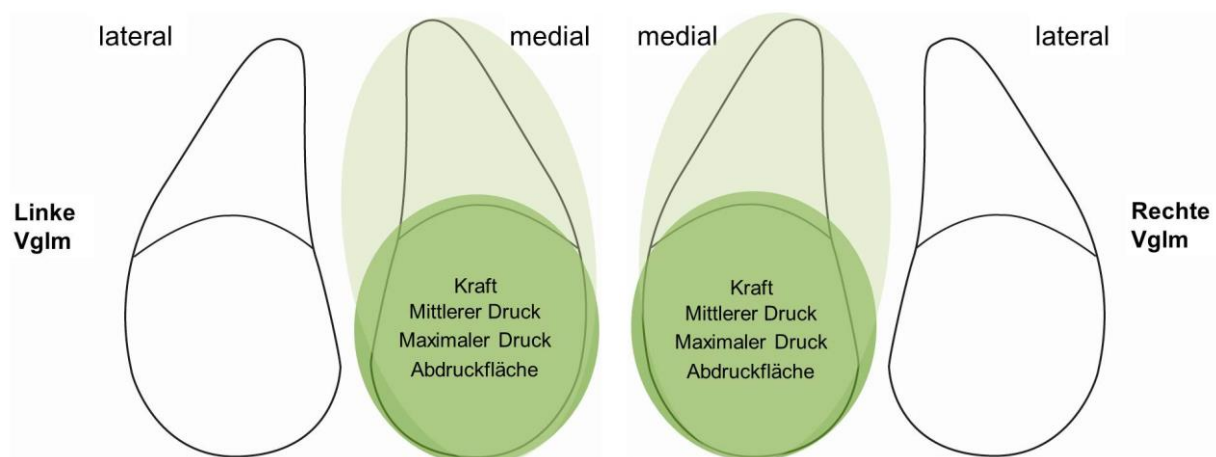


Abbildung 56: Lokalisationen der grössten Kraft, des grössten mittleren und maximalen Druckes sowie der grössten Abdruckfläche an der linken und rechten Vordergliedmasse (Vglm), Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Darstellung anhand des arithmetischen Mittelwerts und der Mehrheit der Tiere (grün = Innenklaue).

Innerhalb der linken Vordergliedmasse, an welcher es im Vergleich zur Ausgangssituation bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K zu einer Kräftezunahme bei einer Mehrheit der Tiere kam, wurde die Aussenklaue ebenfalls bei einer Mehrheit der Tiere stärker belastet. Der Maximaldruck an dieser Klaue nahm signifikant zu. An der Innenklaue dieser Gliedmasse waren bei einer Mehrheit der Tiere eine Kräftereduktion und eine Reduktion des mittleren Druckes sowie insgesamt eine signifikante Reduktion des Maximaldruckes festzustellen. Innerhalb der rechten Vordergliedmasse, auf welche bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K signifikant weniger Kraft fiel sowie an welcher ein signifikant kleinerer mittlerer und maximaler Druck gemessen wurde als bei der Ausgangssituation, war die Druckreduktion (mittlerer und maximaler Druck) an der Innenklaue signifikant (für einen Überblick über alle Veränderungen der vier Haupt-Messparameter von der Ausgangs- zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin siehe Anhang, Abb. 62).

7. Diskussion

In der hier vorgelegten Untersuchung konnte erstmals nachgewiesen werden, dass die Innenklaue der Schultergliedmasse durch das höhere Sohlenniveau der Aussenklaue entlastet wurde. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass durch einen Kothurn an der Aussenklaue einer Schultergliedmasse respektive an der Innenklaue einer Beckengliedmasse jeweils die kontralaterale Gliedmasse bei einer knappen Mehrheit der Tiere mehrbelastet war und im Falle der Beckengliedmasse diese Kraft an der für Erkrankungen prädisponierten Aussenklaue signifikant anstieg. Zudem fiel infolge des Anbringens eines Kothurns an die Innenklaue einer Beckengliedmasse signifikant mehr Gewicht auf die ipsilaterale Schultergliedmasse.

Die Anzahl der eingesetzten Versuchstiere kann nach Beurteilung der Resultate hinsichtlich der Signifikanz und der klinischen Relevanz von Unterschieden zwischen der Ausgangssituation und den Messsituationen mit Holzplättchen als ausreichend betrachtet werden. Für die Fragen nach einer Gewichtsverlagerung auf die kontralateralen Gliedmassen, zwischen Vorder- und Hintergliedmassen sowie innerhalb des anderen Gliedmassenpaars als Antwort auf einen Kothurn, wo die Unterschiede nicht bei allen Tieren gleichermassen vorhanden oder sehr gering und deshalb nicht signifikant waren, hätte vermutlich eine grössere Stichprobe die Aussagekraft der Messungen erhöht, nicht aber unbedingt deren klinischen Relevanz. Für die Versuche wurden nur jüngere Kühe ausgewählt, da diese tendenziell noch klauengesünder sind als ältere und deren Klauen eine „normalere“ Form aufweisen.

Sämtliche für die Versuche zum Einsatz gekommenen Kühe waren zwischen einem Monat und 7 Monaten tragend, damit sich die Trächtigkeit und Milchleistung möglichst wenig auf die Belastung auswirken sollten. Eine Korrelation zwischen der Trächtigkeitsdauer und dem prozentualen Gewichtsanteil, der auf den Hintergliedmassen lastete, war bei diesen 28 Kühen nicht festzustellen (Korrelationskoeffizient nach Spearman: $r = 0.079$). Die Tagesgemelke zeigten nur schwache Korrelationen mit dem prozentualen Anteil des Körpergewichts auf den Hintergliedmassen (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.117$ für Tagesgemelk im Heimbetrieb, $r = 0.120$ für Tagesgemelk am Tierspital). Wie beim Trächtigkeitsstadium gab es aber auch durch die Milchleistungen eine gleichmässige Beeinflussung aller Messsituationen, sodass die Vergleiche zwischen diesen davon nicht tangiert wurden.

Das Körpergewicht der Kühe variierte zwischen 520 kg und 750 kg – was einer Spannweite der Gewichtskraft von über 2000 N entsprach –, war aber normalverteilt. Entscheidender als

ein Vergleich der absoluten Kräftewerte von Tier zu Tier war wegen der grossen Körpermasseunterschiede der Vergleich der Kräfteverhältnisse. Das aus den gemessenen Kräften berechnete Gewicht war bei allen Messsituationen im Mittel leichtgradig geringer als die auf der Waage gewogene Körpermasse (Differenzen zwischen 20.9 kg und 30.4 kg). Auch nach Bruderer (2015) gab es einen Unterschied zwischen dem auf der Waage gewogenen und dem aus den Kräften berechneten Gewicht. Allerdings war dieser kleiner (im Durchschnitt 3.3 kg) und wurde von der Autorin durch das zeitversetzte Messen der beiden Gliedmassenpaare oder aber auch durch kurzzeitigen Gewichtsverlust durch das Absetzen von Kot erklärt. Als Erklärung für den stets in gleicher Richtung festgestellten Gewichtsunterschied kommt auch eine unterschiedliche Euterfüllung in Frage (Chapinal et al., 2009). Aufgrund der Tatsache, dass die Lasten auf den beiden Gliedmassenpaaren zwischen den einzelnen Messungen variierten und nicht immer zu einem gleichen 100 %-Gewicht addiert wurden, muss die berechnete Verteilung des Körpergewichts auf Vorder- und Hintergliedmassen jeweils mit Vorsicht beurteilt und zwischen den Messsituationen verglichen werden.

Zur Minimierung der Zufälligkeit der Messwerte wurde entschieden, alle Messungen dreimal zu wiederholen. Für die Messwiederholungen wurden die Kühe stets wieder neu auf den Platten platziert, indem man sie beispielsweise durch leichtes Ziehen an den Afterklauen dazu veranlasste, die Klauen anzuheben, oder sie von Neuem auf den Messstand führte. Bei den Ausgangsmessungen und den Messungen mit den Holzplättchen (also bei den Messsituationen a bis c in Abb. 14) war das Ziel, eine Gliedmassenlastverteilung von möglichst nahe an 50.0 % zu 50.0 % zu erreichen. Hierfür wurde auch darauf geachtet, dass die linke und die rechte Gliedmasse möglichst in einer Linie standen, das heisst, in y-Richtung nur sehr wenig voneinander abwichen. Schliesslich wurde diejenige Wiederholungsmessung für die Datenanalyse ausgewählt, welche am nächsten an einer ausgeglichenen Lastverteilung zwischen linker und rechter Gliedmasse lag. So lagen bei 74.1 % der ausgewählten Messungen der Ausgangssituation und der beiden Messsituationen mit Holzplättchen die Gliedmassenlastanteile zwischen 45.0 % und 55.0 %, bei 94.6 % der Messungen zwischen 40.0 % und 60.0 % und die aus den Kräfte-Mittelwerten berechneten prozentualen Gliedmassenlastanteile allesamt zwischen 49.0 % und 51.0 %. Es gelang demnach gut, die Kühe so zu positionieren, dass sie eine weitgehend ausgeglichene Lastverteilung auf die jeweilig linke und rechte Gliedmasse vorwiesen, auch wenn Gliedmassenabstände in y-Richtung von im arithmetischen Mittel oder im Median 1.9 cm bis 5.7 cm akzeptiert werden mussten.

Bei den Messungen mit den Kothurnen (Messsituationen d und e in Abb. 14) fiel schon bei den ersten zu messenden Kühen auf, dass dieselbe Kuh bei den 3 Wiederholungsmessungen teilweise unterschiedliche Gliedmassenstellungen und damit unterschiedliche Lastverteilungen auf linke und rechte Vorder- oder Hintergliedmassen zeigte: Bei der einen Messung entlastete die Kuh die Gliedmasse mit dem Kothurn noch, bei der anderen überlastete sie die Gliedmasse sogar. Die Kühe platzierten ihre Gliedmassen dabei nicht nur in x-, sondern auch in y-Richtung teilweise weiter auseinander als bei den Messungen der Ausgangssituation und mit den Holzplättchen. So betrugen die Abstände in y-Richtung schliesslich im arithmetischen Mittel zwischen 5.1 cm und 5.7 cm. Es ist anzunehmen, dass die Kühe ihre Gliedmassen vermutlich deswegen nicht symmetrisch platzierten, weil die betreffende Gliedmasse durch den Kothurn verlängert wurde. Dazu passt, dass die linken Gliedmassen+K jeweils häufiger weiter kranial platziert waren als die rechten Gliedmassen. Bei Kühen mit auffällig gegensätzlichen Lastverhältnissen zwischen linker und rechter Gliedmasse in den ersten 3 Wiederholungsmessungen wurden – mit der Absicht, ein aussagekräftigeres Abbild zu generieren, – noch zusätzliche Wiederholungsmessungen (bis zu 6) durchgeführt. Es schien also nicht möglich, anhand nur einer Messung ein dem natürlichen Stand der Kuh nahes Ergebnis zu erhalten. So wurde anschliessend die gesamte Anzahl der Messungen gemittelt.

Da die Berechnung der Klauenabdruckflächen auf den belasteten Sensoren beruhte, war die maximale Genauigkeit dieser Flächen von der Grösse der Sensorfläche abhängig. Die Ränder der Klauen wurden demnach nicht vollständig realitätsgetreu auf der Druckmessplatte „abgebildet“, da auch bei nur teilweise belasteter Sensorfläche eine ganze Sensorfläche zur Abdruckfläche hinzugerechnet wurde. Ob ein Sensor mehr oder einer weniger als belastet galt, war wiederum abhängig von dessen Schwellenwert (0.4 N), ab welchem eine Belastung registriert wurde. Somit muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund der ungenauen Randzonen die realen Klauenabdruckflächen stets entweder leichtgradig über- oder unterschätzt wurden.

Auch die Aufteilung der Abdruckflächen einer Gliedmasse in die vier Hauptzonen war einerseits von der Flächenauflösung der Druckmessplatte abhängig und andererseits von der Zuteilung der belasteten Sensoren in diese Zonen, welche nicht automatisch, sondern von Hand mithilfe von Klauenschablonen erfolgte. Da bereits diese Zuteilung in vier Zonen aufgrund der tierindividuellen Klauengrössen und -formen fehleranfällig war, wurden nicht wie bei den Untersuchungen von van der Tol et al. (2002), Gerwing (2003) oder Carvalho et al. (2006)

noch mehr Zonen unterschieden. Dank den Grenzzonen konnten die Werte derjenigen Sensoren, deren Zonenzugehörigkeit aufgrund ihrer Lage auf der Grenzlinie zwischen zwei Hauptzonen nicht ohne Willkür zu bestimmen war, auf die beiden angrenzenden Hauptzonen hälftig aufgeteilt werden, was die Genauigkeit der Werte auf Hauptzonenlevel erhöhte. Kritisch betrachtet werden muss allerdings, dass die Klauenschablonen zwar individuell auf die jeweiligen Klauengrösse eingestellt werden konnten, die Grenzlinie aber vorgezeichnet war, und sich daher an einer „standardisierten“ Stelle befand und nicht je nach Klauenform noch speziell angepasst werden konnte.

Weitere Faktoren, welche die Flächenmessung durch die Druckmessplatte beeinflussen konnten, waren die beiden dünnen Gummimatten, welche auf den Messplatten lagen. Sie waren jedoch zu deren Schutz zwingend nötig, auch wenn dadurch mögliche Messungenauigkeiten in Kauf genommen werden mussten. Aufgrund einer gewissen Elastizität dieser Gummimatten war mit einer leichten Flächenvergrösserung im Vergleich zu den realen Sohlenflächen der Klauen zu rechnen. Direkt an den Klauen wurden Sohlenflächen auf Gliedmassenlevel zwischen 80 cm^2 und 120 cm^2 (Feszl, 1968; Schneider, 1980; Baumgartner, 1988; Nuss und Paulus, 2006; Nuss et al., 2011) gemessen – demnach Werte, die oft über denen der hier vorliegenden Arbeit (im Mittel zwischen 78.5 cm^2 und 81.0 cm^2) lagen. Krebs et al. (2011) massen in einem Experiment etwas kleinere (67 cm^2), in einem anderen etwas grössere Sohlenflächen (88 cm^2) als in der vorliegenden Arbeit. Demnach fielen die Abdruckflächen der hier vorgelegten Untersuchung tendenziell kleiner aus als die direkt an den Klauen gemessenen Flächen, was darauf hinweist, dass möglicherweise nicht alle Anteile der Klauensohle belastet oder durch die Sensoren wiedergegeben wurden.

Die Verwendung von Holzplättchen zur Simulation zweier unterschiedlich hoher Partnerklauen einer Vordergliedmasse hatte einen vergrössernden Einfluss auf die „Sohlenflächen“ der betroffenen Klauen, weil die Holzplättchen stets 12.5 cm lang und 5.5 cm breit waren und keine Hohlkehlung aufwiesen. Bei beiden Messsituationen mit Holzplättchen waren folglich an den „Holzplättchenklauen“ tatsächlich signifikante Flächenzunahmen im Vergleich zur Ausgangssituation festzustellen. Jedoch stimmten die gemessenen Abdruckflächen nicht mit der bestimmten Kothurnfläche (63.9 cm^2) überein. So betrugen die Abdruckflächen der Klauen mit Holzplättchen oder Kothurn im Mittel zwischen 54.9 cm^2 und 59.7 cm^2 . Am wahrscheinlichsten scheint, dass der Schwellenwert der Druckmessplatte für die unerwartet geringer ausgefallenen Abdruckflächen mit Holzplättchen oder Kothurn verantwortlich war. Mög-

licherweise fanden durch das Klebeband aber eine leichte Vergrößerung der Kontaktflächen und zudem eine leichte Erhöhung der Holzplättchen oder Kothurne statt. Um diesen Fehler möglichst klein zu halten, wurde nur so wenig Klebeband wie nötig verwendet. Nur in wenigen Fällen kam es zu einem Verlust der Holzplättchen oder Kothurne auf dem Weg vom Klauenstand zum Messstand.

Nicht nur das Körpergewicht der Tiere der Versuchsgruppe war unterschiedlich, sondern auch bei den Abdruckflächen der Klauen existierte eine grosse Spannweite. So nahmen letztere an den gepflegten Klauen der Vordergliedmassen Werte zwischen 48.4 cm^2 und 129.1 cm^2 , an denjenigen der Hintergliedmassen solche zwischen 60.4 cm^2 und 118.1 cm^2 an. Solche tierindividuellen Unterschiede machten wiederum Druckvergleiche von Tier zu Tier schwierig. So korrelierten die mittleren Drücke an den Klauen einer Vorder- oder Hintergliedmasse signifikant stark negativ mit deren Abdruckflächen (Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson respektive Spearman: $r = -0.872^{**}$ respektive $r = -0.806^{**}$). Auch die Vergrößerung der Sohlenflächen durch Holzplättchen, Klebeband und / oder Kothurne hatten einen direkten Einfluss auf die gemessenen Drücke. So veränderten sich die mittleren Drücke durch die Flächenzunahmen (um die Faktoren 1.71 bei der Aussenklaue+H respektive 1.26 bei der Innenklaue+H) von der Ausgangssituation zu den beiden Messsituationen mit Holzplättchen hin um die Faktoren 0.99 respektive 0.94. Bei den „Kothurnklauen“ kam es jedoch – im Gegensatz zu den „Holzplättchenklauen“ – trotz gleichzeitiger Kräfte- und Flächenzunahmen auch noch zu Druckzunahmen; dies, weil die Kräftezunahmen (Zunahmen um die Faktoren 3.1 respektive 2.7) um ein Vielfaches grösser waren als die Flächenzunahmen (Zunahmen um die Faktoren 1.7 respektive 1.8).

Druckmessplatten wie das hier verwendete Modell kamen schon für Messungen an Pferdehufen (Rogers und Back, 2003; van Heel et al., 2004; Oosterlinck et al., 2011, 2012; Gomes-Costa et al., 2015), an Schweine- (Carvalho et al., 2009; Meijer et al., 2014), Schaf- (Agostinho et al., 2012) oder Rinderklauen (van der Tol et al., 2002, 2003, 2004; Alsleben et al., 2003; Gerwing, 2003; Huth et al., 2004, 2005; Carvalho et al., 2005, 2006; Zeiner et al., 2007; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018; Müller, 2018), an Katzen- (Lascelles et al., 2007) und Hunde-Pfoten (Besancon et al., 2003; Lascelles et al., 2006; Le Quang et al., 2007) und sogar an Füßen von Zwergschimpansen (Vereecke et al., 2003) zum Einsatz. Die scharfen Kanten der Rinderklauen stellten allerdings eine Gefahr für die Messsensoren dar, da es durch die beim Füssen auftretenden hohen Scherkräfte zur Loslösung von Leiterbahnen der Druck-

messplatte kommen konnte (Gerwing 2003). Deswegen wurde die Messplatte für die hier vorgelegte Untersuchung zu Beginn und nach der Hälfte der durchgeführten Versuche vorsorglich an den Hersteller gesandt, welcher die druckempfindliche Schicht austauschte. Das Einwirken punktuell besonders grosser Scherkräfte wurde durch das Schaffen einer langen Laufbahn auf den Messstand hinauf und von diesem wieder hinunter zu vermeiden versucht. Es wurde speziell darauf geachtet, dass die Kühe auf der messplattennahen Seite den Messstand ebenerdig verlassen konnten, sodass keine grossen Abstosskräfte durch die Klauen der Hintergliedmassen auf die Platten einwirkten. Die Platten wurden zudem durch eine vom Hersteller empfohlene feine Kunststoffmatte und eine zusätzliche, dünne Gummimatte geschützt. Während der Versuche wurde laufend überprüft, ob die in der „Auswerter-Datei“ pro Sensor angegebenen Kräfte in einem realistischen Bereich lagen, ob sie logisch über die Klauenfläche verteilt waren und ob auch sehr kleine Kräfte ($< 1\text{ N}$) registriert wurden. Dies war bei jeder einzelnen Messung der Fall. Bei einzelnen Messungen waren sogar kleinere oder auch grössere Kräfte pro Sensor registriert worden (0.2 N respektive 87.7 N pro Sensorfläche), als der Hersteller als Messbereich (0.4 N bis 49.5 N pro Sensorfläche) angab.

Die bei der Ausgangssituation aus den Kräfte-Mittelwerten berechneten Lastanteile von 52.9 % für die beiden Vordergliedmassen respektive 47.1 % für die beiden Hintergliedmassen stimmten mit vorhandenen Literaturangaben überein. Dort wurden für die Vordergliedmassen jeweils zwischen 53.7 % und 62.2 % des Körpergewichts und für die Hintergliedmassen zwischen 45.3 % und 48.6 % festgestellt (Feszl, 1968; Scott, 1988; van der Tol et al., 2004; Neveux et al., 2006; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018). In der hier vorgelegten Untersuchung wurde sowohl die vermehrte Belastung der Innenklaue an den Vordergliedmassen (Gliedmassenlastanteil von 70.1 %) als auch die vermehrte Belastung der Aussenklaue an den Hintergliedmassen (Gliedmassenlastanteil von 65.7 %), wie sie schon in verschiedensten Untersuchungen an gepflegten Klauen (Mair et al., 1988; Spielmann, 1990; Hubert, 1993; van der Tol et al., 2004; Bruderer, 2015; Cardona Gavaldon, 2018; Müller, 2018) vorgefunden wurden, bestätigt. Nur Mair et al. (1988) fand zwischen Aussen- und Innenklaue einer Vordergliedmasse deutlich weniger stark divergierende Lastanteile (46.9 % zu 53.1 %) vor. Die am stärksten belasteten Klauenzonen waren an einer Vordergliedmasse die Ballenzone der Innenklaue (Gliedmassenlastanteil von 54.0 %) und an einer Hintergliedmasse die Ballenzone der Aussenklaue (Gliedmassenlastanteil von 45.2 %). Der Zusammenhang zwischen den am stärksten belasteten Klauen respektive Klauenzonen und den häufigsten Lokalisationen von Klauenhornläsionen wurde demnach durch die vorliegende Arbeit bestätigt.

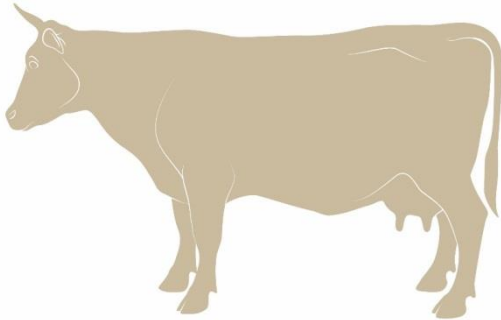
Mit der hier vorgelegten Untersuchung konnte erstmals nachgewiesen werden, dass durch das vermehrte Kürzen der Innenklauen der Vorderbeine eine gleichmässige Belastung von Innen- und Aussenklauen erreicht werden kann. Durch die Erhöhung der Aussenklauen mit den 3 mm hohen Holzplättchen verringerte sich der Lastanteil der Innenklauen von 70.1 % auf 49.6 %. Wenn die Holzplättchen an die Innenklauen angebracht waren, erhöhte sich der Lastanteil dieser Klauen auf 82.5 %. Auch in den Klauenzonen wirkte sich das mit den Holzplättchen an den Aussenklauen simulierte vermehrte Abschleifen der Innenklauen entlastend auf diese aus, indem eine Kräfteverschiebung weg von der Ballenzone der Innenklaue hin zur Ballenzone der Aussenklaue stattfand.

Diese Erkenntnisse können gezielt zur Prophylaxe von überlastungsbedingten Klauenläsionen an der Innenklaue im Rahmen der funktionellen Klauenpflege oder auch als Therapiebaustein im Rahmen der therapeutischen Klauenpflege eingesetzt werden. Die Überlegungen von Sigmund et al. (2010), ob die Aussenklaue an einer Vordergliedmasse nicht höher als die Innenklaue belassen werden sollte, da ansonsten deren Belastung infolge des Abkippen des Fusses gegen die Mediane hin verstärkt würde, wurden somit nicht bestätigt.

Zwischen einzelnen Tieren waren deutlich unterschiedliche Lastverhältnisse zwischen der Aussenklaue+H und der Innenklaue vorhanden. Diese reichten von 13.7 % zu 86.3 % bis hin zu 83.8 % zu 16.2 %. Das Ziel einer Lastreduktion an der Innenklaue im Vergleich zur Ausgangssituation wurde aber bei 25 von 28 Tieren erreicht. Bei der Messsituation Innenklaue+H war Ähnliches festzustellen: Bei 22 von 28 Tieren kam es zu einer Kräftezunahme an der Innenklaue und nur bei 6 Tieren zu einer Kräfteabnahme. Insgesamt blieb aber bei allen 28 Tieren die Innenklaue stärker belastet als die Aussenklaue. Als Erklärung für die nicht vollständig gleichartigen Belastungsverhältnisse kommen mehrere Gründe in Frage. Allenfalls wäre bei denjenigen Tieren, bei denen die Innenklauen bei der Messsituation Aussenklaue+H weiterhin stärker als die Aussenklauen belastet wurden, ein grösserer Höhenunterschied als 3 mm zwischen den Zehen für eine Entlastung der Innenklaue nötig gewesen. Weiterhin könnte das auf Augenmass basierende Angleichen der Sohlenflächen von Aussen- und Innenklaue zu einer minim unausgeglichene Ausgangssituation geführt haben, was wiederum verzerrend auf den Vergleich mit den Holzplättchen gewirkt haben könnte. Zuletzt könnten die unterschiedlichen Kräfteverhältnisse dafür sprechen, dass die Biomechanik der Vordergliedmassen tierindividuell oder auch messungsbedingt unterschiedlich ist.

Die Überlegung, dass es durch eine Erhöhung der Vordergliedmassen zu einer Gewichtsverschiebung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen kommen könnte, hatte ihren Ursprung in den Untersuchungen von Chapinal et al. (2009), Bruderer (2015) sowie Cardona Gavaldon (2018). Allerdings stellte einzig Cardona Gavaldon (2018) bei einem um 25 cm erhöhtem Stand beider Vordergliedmassen eine signifikante Gewichtsübertragung fest, und zwar von den Hinter- auf die Vordergliedmassen (Verschiebung um 0.7 Prozentpunkte). Sie erklärte dies damit, dass in dieser Position Kopf und Hals gesenkt wurden. Bei den hier vorgelegten Versuchen fand nur eine deutlich kleinere Erhöhung der Vordergliedmassen als in den drei oben genannten Untersuchungen (0.3 cm versus 7.5 cm, 15 cm oder 25 cm) statt, sodass aufgrund des Höhenunterschieds keine Gewichtsverschiebung zwischen den Gliedmassenpaaren erwartet wurde. Eine Gewichtsverlagerung wäre aber dennoch denkbar gewesen, sofern die Holzplättchen für die Kühe einen unbequemen Klauenuntergrund darstellten. In Anlehnung an die Versuche von Neveux et al. (2006) wäre dann zu erwarten gewesen, dass die Kühe Gewicht von den Vorder- auf die Hinterbeine übertragen würden.

Tabelle 50: Gewichtskräfte und Gewichtsanteile (bezogen auf das Gesamtgewicht) an den Vorder- und Hintergliedmassen sowie aus den Kräften berechnetes Körpergewicht der Tiere bei der Ausgangssituation (A), der Messsituation Aussenklaue+H (M HAK) und der Messsituation Innenklaue+H (M HIK). Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ). Integrierte Abbildung erstellt von: Jeanne Peter, Pascal Glatzfelder, Vetcom UZH.

|  | | | | | |
|---|--------------------|--|--|---|--|
| | Gruppen- grösse | Gewichtskraft in N, prozentualer Gewichtsanteil | | Körpergewicht in kg | |
| | | Vordergliedmassen | Hintergliedmassen | (aus Kräften berechnet) | |
| A | n = 28 | 3199.6 (σ = 319.7), 52.9 * ¹ | 2847.8 (σ = 239.9), 47.1 * ¹ | 616.5 (σ = 54.6) | |
| | n = 15 | 3072.4 (σ = 339.1), 52.6 | 2763.8 (σ = 281.4), 47.4 | 594.9 (σ = 61.2) * ⁴ | |
| M HAK | n = 28 | 3162.4 (σ = 311.1) | | | |
| | n = 15 | 3068.7 (σ = 303.5), 53.1 * ² | 2711.3 (σ = 294.5), 46.9 * ² | 589.2 (σ = 60.1) | |
| M HIK | n = 28 | 3193.6 (σ = 279.9) | | | |
| | n = 15 | 3064.0 (σ = 287.2), 53.2 * ³ | 2695.3 (σ = 317.4), 46.8 * ³ | 587.1 (σ = 59.1) * ⁴ | |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Bei den 15 Kühen der hier vorgelegten Untersuchung, bei welchen beide Gliedmassenpaare vermessen wurden, wurde an den Vordergliedmassen zwar eine nicht signifikante Zunahme um 0.5 Prozentpunkte respektive 0.6 Prozentpunkte festgestellt. Die absoluten Zahlen für die Kräfte in Newton an den Vorder- und an den Hintergliedmassen und auch das aus den Kräften berechnete Körpergewicht der Tiere waren jedoch allesamt geringer als bei der Ausgangssituation (Tab. 50). Die Tiere schienen also insgesamt an Körpergewicht verloren zu haben. Da eine Diskrepanz des Körpergewichts der Tiere zwischen den Messungen, die zeitlich direkt nacheinander durchgeführt wurden, nicht realistisch ist, sind auch die Veränderungen der Kräfte an den einzelnen Gliedmassenpaaren nicht als real und ernstzunehmend einzustufen. Eine Gewichtsverschiebung zwischen Vorder- und Hintergliedmassen scheint durch die 3 mm dicken Holzplättchen also nicht stattgefunden zu haben.

Die bei den 28 Kühen der hier vorgelegten Untersuchung in der Ausgangssituation erhobenen Klauenabdruckflächen unterstützen die bereits in vielen Untersuchungen festgestellten Asymmetrien zwischen den Sohlenflächen der Aussen- und Innenklauen. An den Vordergliedmassen wies die Innenklaue eine signifikant grössere Abdruckfläche als die Aussenklaue auf ($\mu_{IK} = 45.6 \text{ cm}^2$ versus $\mu_{AK} = 32.9 \text{ cm}^2$). An den Hintergliedmassen war die Abdruckfläche der Aussenklaue signifikant grösser als die der Innenklaue ($\mu_{AK} = 47.6 \text{ cm}^2$ versus $\mu_{IK} = 33.3 \text{ cm}^2$). Die absoluten Werte für die Klauenabdruckflächen stimmen gut mit denen nach Müller (2018) überein, die den gleichen Messstand verwendete. Sie liegen aber deutlich höher als diejenigen nach Spielmann (1990), Gerwing (2003), van der Tol et al. (2004) sowie Bruderer (2015), obwohl letztere ebenfalls den gleichen Messstand benutzte. Im Vergleich zu den direkten Messungen (Feszl, 1968; Schneider, 1980; Baumgartner, 1988; Nuss und Paulus, 2006; Krebs et al., 2011; Nuss et al., 2011) ergaben sich für die in der vorgelegten Untersuchung gemessenen Abdruckflächen geringere Unterschiede, wobei die meisten direkt gemessenen Sohlenflächen etwas grösser waren als diejenigen aus der hier vorgelegten Untersuchung. Bei den genannten direkten Messungen waren zudem weniger grosse Standardabweichungen für die Sohlenflächen festgestellt worden. In der vorgelegten Untersuchung schwankte hingegen beispielsweise die Abdruckfläche der Aussenklaue an den Vordergliedmassen zwischen 12.7 cm^2 und 64.6 cm^2 und diejenige der Innenklaue an den Hintergliedmassen zwischen 15.9 cm^2 und 52.5 cm^2 . Es konnten positive Korrelationen zwischen den Klauenabdruckflächen und dem Alter, der Laktationsnummer sowie dem Gewicht der Tiere festgestellt werden (insbesondere für die beiden jeweils stärker belasteten Klauen), wie sie auch schon in anderen Studien aufgezeigt worden waren (Feszl, 1968; Sigmund, 2009; Brude-

rer, 2015). Die grossen Flächenunterschiede sind aber nicht durch die verschiedenen Kühe zu erklären, da die kleinen Flächen nicht mit den tatsächlich vorhandenen Sohlenflächen übereinstimmen können, sondern waren wahrscheinlich durch die Messeinrichtung und die Klauenbelastung beeinflusst. So ist eine Verfälschung aufgrund des nicht ganz bei 0 N pro Sensorfläche liegenden Schwellenwerts der Drucksensoren oder aufgrund eines möglichen Verschleisses gewisser Drucksensoren nicht ganz auszuschliessen. Die zwischen den einzelnen Studien mittels indirekten Messungen erhaltenen unterschiedlichen Zahlen könnten neben der Tierindividualität auch von unterschiedlich gepflegten Klauen (mit mehr oder weniger Hohlkehlung und damit kleinerer oder grösserer fussenden Sohlenfläche) herrühren oder aber auch von unterschiedlichen Schwellenwerten der Drucksensoren. So war bei van der Tol et al. (2004) der Schwellenwert der Drucksensoren tatsächlich mit 15 N pro Sensorfläche deutlich höher als bei den hier durchgeführten Versuchen, was eine Erklärung für die vorliegend grösseren Abdruckflächen sein könnte.

In der hier vorgelegten Untersuchung wurden zusätzlich Korrelationen zwischen Kraft auf einer Klaue und Klauenabdruckfläche gefunden. Je stärker die beiden durchschnittlich jeweils weniger belasteten Klauen einer Gliedmasse belastet waren – und je kleiner die Kräfte an ihren Partnerklauen waren - desto grösser wurden ihre Abdruckflächen. Dies lässt vermuten, dass bei stärkerer Belastung jeweils ein grösserer Anteil der Klauensohle mit der Druckmessplatte in Kontakt kam und der Schwellenwert der Sensoren häufiger überschritten wurde. Die Abdruckflächen der beiden Klauen einer Gliedmasse könnten also auch noch von der jeweiligen Lastverteilung zwischen den beiden Klauen abhängen.

Bei den Messungen der Ausgangssituation wurden an einer Vordergliedmasse signifikant grössere mittlere und maximale Drücke ($\mu = 21.8 \text{ N / cm}^2$ und $\mu = 125.8 \text{ N / cm}^2$) als an einer Hintergliedmasse ($\mu = 18.0 \text{ N / cm}^2$ und $\mu = 100.4 \text{ N / cm}^2$) festgestellt. Dies ist einerseits durch die signifikant stärkere Belastung der Vordergliedmassen, andererseits auch durch die bei einer Mehrheit der Tiere kleinere Klauenabdruckfläche der Vordergliedmassen im Vergleich zu den Hintergliedmassen zu erklären. Auch van der Tol et al. (2004) und Bruderer (2015) fanden an den Vordergliedmassen einen grösseren mittleren sowie maximalen Druck als an den Hintergliedmassen. Die absoluten Werte für die mittleren Drücke in den beiden letztgenannten Arbeiten sind allerdings deutlich grösser als diejenigen der hier vorgelegten Untersuchung. Bruderer (2015) ermittelte mittlere Drücke zwischen 31 N / cm^2 und 36 N / cm^2 , van der Tol et al. (2004) solche zwischen 50 N / cm^2 und 60 N / cm^2 . Mögliche

Gründe dafür sind die bereits erwähnten tierindividuell unterschiedlich grossen Klauenabdruckflächen und Körpergewichte sowie die je nach Klauenpflege unterschiedlichen Klauensohlenprofile. Die Werte für die Maximaldrücke dieser genannten Arbeiten waren hingegen ähnlich hoch oder nur leicht höher als diejenigen aus den vorliegenden Versuchen (Vordergliedmassen: 124 N / cm^2 respektive 146 N / cm^2 , Hintergliedmassen: 89 N / cm^2 respektive 110 N / cm^2). Dies ist der Fall, weil die Maximaldrücke weniger stark von den Sohlenflächen beeinflusst werden als die mittleren Drücke. Zudem spricht dies dafür, dass die Gewichtskräfte, welche an den jeweiligen Klauen registriert wurden, ungefähr vergleichbar waren (im Gegensatz zu den Flächen). Tatsächlich waren die von Bruderer (2015) verwendeten Kühe im Durchschnitt beinahe gleich schwer wie diejenigen der hier vorgelegten Untersuchung (641 kg versus 637 kg) und die von van der Tol et al. (2004) verwendeten nur leicht schwerer (704 kg).

Weiter wurden in der vorgelegten Arbeit an den in der Ausgangssituation am stärksten belasteten Klauen auch die höheren mittleren und maximalen Drücke gemessen. Übereinstimmend mit anderen Untersuchungen (Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2002; Bruderer, 2015; Müller, 2018) waren an den Vordergliedmassen die mittleren und maximalen Drücke an der Innenklaue ($\mu = 25.3 \text{ N / cm}^2$ respektive 120.6 N / cm^2) signifikant grösser als diejenigen an der Aussenklaue ($\mu = 14.0 \text{ N / cm}^2$ respektive 60.1 N / cm^2) und an den Hintergliedmassen jene an der Aussenklaue ($\mu = 20.0 \text{ N / cm}^2$ respektive 96.6 N / cm^2) signifikant grösser als jene an der Innenklaue ($\mu = 14.5 \text{ N / cm}^2$ respektive 63.7 N / cm^2). Festzuhalten ist, dass diese unterschiedlichen Druckzustände an Aussen- und Innenklaue stets bei frisch gepflegten Klauen vorgefunden wurden. Nach Gerwing (2003) konnte bei ebenfalls erst vor einem Tag gepflegten Klauen im Gegensatz dazu eine Umkehr des Druckverhältnisses zwischen Aussen- und Innenklaue einer Hintergliedmasse erreicht werden: Der mittlere Druck an der Aussenklaue sank von $> 31 \text{ N / cm}^2$ auf $< 23 \text{ N / cm}^2$ und stieg dafür an der Innenklaue von $< 25 \text{ N / cm}^2$ auf $> 33 \text{ N / cm}^2$ an. Nach Hubert und Distl (1994) waren der mittlere und maximale Druck innerhalb einer Vordergliedmasse an der Innenklaue nach Klauenpflege zwar immer noch höher, aber die beiden Werte von Aussen- und Innenklaue hatten sich angenähert (allerdings verringerte sich an beiden Klauen der Druck). Müller (2018), welche für gepflegte Klauen der Hintergliedmassen ähnliche absolute Werte für die mittleren ($\mu_{AK} = 21.1 \text{ N / cm}^2$, $\mu_{IK} = 12.7 \text{ N / cm}^2$) und maximalen ($\mu_{AK} = 98.8 \text{ N / cm}^2$, $\mu_{IK} = 52.1 \text{ N / cm}^2$) Drücke wie in der hier vorgelegten Untersuchung feststellte, konnte beim

Vergleich der Werte von vor zu nach Klauenpflege eine Druckabnahme an der Aussen- und eine Druckzunahme an der Innenklaue ermitteln.

Die Druckdifferenzen zwischen Aussen- und Innenklauen waren bei den 28 hier untersuchten Kühen an den Vordergliedmassen ausgeprägter als an den Hintergliedmassen. An der Innenklaue einer Vordergliedmasse wurden ein signifikant grösserer mittlerer sowie maximaler Druck registriert als an der Aussenklaue einer Hintergliedmasse. Die Innenklaue der Vordergliedmassen trug also pro gleiche Fläche die grössere Last und erfuhr die grösseren Belastungsspitzen. Die Innenklauen der Schultergliedmassen erkrankten dennoch weniger häufig als die Aussenklauen der Beckengliedmassen, weswegen die vermehrte Belastung als alleiniger auslösender Faktor für Sohlengeschwüre in Frage gestellt wird. Auf Klauenzonenlevel wurden die grössten mittleren und maximalen Drücke – korrespondierend mit dem Ort der grössten Belastung – jeweils in den Ballenzonen dieser beiden Klauen gefunden. Dies war bei den meisten Vorgängerstudien auch der Fall (Mair et al., 1988; Mair, 1989; Distl et al., 1990; Hubert und Distl, 1994; van der Tol et al., 2002; Gerwing, 2003; Kehler und Gerwing, 2004; Zeiner et al., 2007; Zeiner, 2008; Bruderer, 2015; Müller, 2018); allerdings wurde nach Spielmann (1990) der grösste mittlere Druck innerhalb einer Hintergliedmasse in der Spitzenzone der Aussenklaue und nach Carvalho et al. (2005, 2006) der grösste mittlere Druck innerhalb einer Vordergliedmasse in der Ballenzone der Aussenklaue gemessen. Die Gründe für diese Unterschiede sind unklar.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie schädlich die in dieser Untersuchung vorgefundenen Maximaldrücke für die Klauen sind. Um dies abzuschätzen, können die Drücke mit der Stärke des Klauenhorns in Relation gesetzt werden (van der Tol et al., 2003). Hinterhofer et al. (2005b) geben für das Horn im Bereich des harten Ballens eine Klauenhornhärte von durchschnittlich 8.3 N/mm^2 oder 830 N/cm^2 an, welche sie mittels Kugeleindruckversuch evaluierten. Mülling et al. (1994) stellten eine mittlere Klauenhornhärte des harten Ballenhorns von 9.3 N/mm^2 ($= 930 \text{ N/cm}^2$) fest. Die Maximaldrücke, welche bei der hier vorgelegten Untersuchung in den Ballenzonen zu finden waren, lagen im Mittel bei 120.5 N/cm^2 (an den Vordergliedmassen) respektive bei 93.9 N/cm^2 (an den Hintergliedmassen), was zwischen 10 % und 15 % der vorher genannten Härte-Werte ausmacht. Auch die jeweiligen Maxima (264.0 N/cm^2 respektive 187.8 N/cm^2) betrugen höchstens 32 % dieser Härte-Werte. Weiterhin gilt es aber zu bedenken, dass einerseits beim Gehen höhere Drücke einwirken und andererseits, wenn sich die Fussungsfläche wie beispielsweise auf Spaltenboden oder gerilltem

Untergrund verkleinert, punktuell deutlich grössere Maximaldrücke auftreten können als im Stand auf planem Untergrund. So massen van der Tol et al. (2004) beim Abstossen der Klauen Maximaldrücke von 200 N / cm^2 an den Vorder- und 180 N / cm^2 an den Hintergliedmassen.

Am häufigsten waren die Maximaldrücke bei der Ausgangssituation – das heisst auch bei gepflegten Klauen – unterhalb des Tuberculum flexoriums des Klauenbeins der mehrbelasteten Klauen lokalisiert (zu 73.2 % in der Ballenzone der Innenklaue einer Vordergliedmasse, zu 67.9 % in der Ballenzone der Aussenklaue einer Hintergliedmasse). Diese Stelle ist besonders gefährdet für Sohlenquetschungen und Sohlengeschwüre, weil dort im Vergleich zum weichen Ballen verhältnismässig wenig Unterhaut vorhanden ist und der mittlere Fettkörper häufig bindegewebig umgebaut ist und so nur noch wenig polsternd wirkt (Geyer et al., 2014). Wenn in diesem Bereich dann zudem keine Hohlkehlung vorhanden ist, besteht eine noch grössere Gefahr, dass die Lederhaut zwischen dem Klauenbein und der unnachgiebigen Hornsohle gequetscht und dadurch minderdurchblutet wird (Lischer, 2014).

An den Innenklauen der Schultergliedmassen konnte durch das Anbringen der Holzplättchen an die Aussenklauen die Druckbelastung signifikant und im Median um ein Viertel (mittlerer Druck) respektive fast um ein Drittel (maximaler Druck) gesenkt werden. Die ebenso durch das Anbringen der Holzplättchen an den Innenklauen gefundene signifikante Maximaldruckreduktion war weniger ausgeprägt (Abnahme um 8.5 % im Median) und nicht durch eine Minderbelastung, sondern durch die Flächenzunahme durch die Holzplättchen bedingt.

Die in der hier vorgelegten Arbeit bei der Ausgangssituation an beiden Gliedmassenpaaren im Mittelwert vorgefundenen längeren Dorsalwände an den Innenklauen können durch den Längenunterschied zwischen Aussen- und Innenzehe erklärt werden. Muggli et al. (2011) stellten an den Vorder- und Hintergliedmassen von Kühen jeweils um 2.1 mm bis 2.7 mm längere laterale Zehen anhand des knöchernen Skelettes fest. Beim Angleichen der Sohlenniveaus der beiden Klauen wird die Dorsalwand der Aussenklaue aufgrund der weiter nach distal reichenden knöchernen Strukturen der Aussenzehe kürzer als diejenige der Innenklaue. Bei der Interpretation der Dorsalwandlängen gilt es auch zu bedenken, dass das Kürzen der beiden Klauen auf das gleiche Niveau bei der hier vorgelegten Untersuchung nach Augenmass erfolgte. Weiter war die Sohlendicke der Klauen der entscheidende und limitierende Faktor für deren Kürzung, was ebenfalls subjektiv anhand Daumendruck oder Zangenprobe beurteilt wurde. Die Klauen wurden also tierindividuell anhand der Sohlendicken auf eine Dorsalwandlänge ge-

kürzt. Beim Vergleich der Klauenmasse zwischen den Vorder- und Hinterbeinen wurde festgestellt, dass die Klauen der Vordergliedmassen (Aussen- und Innenklau zusammengefasst) im Mittel eine kürzere Dorsalwand (Andersson und Lundström, 1981; Nuss et al., 2011; Cardona Gavaldon, 2018) und einen grösseren Dorsalwandwinkel (Baumgartner, 1988; Nuss et al., 2011; Cardona Gavaldon, 2018) als die Klauen der Hintergliedmassen aufwiesen.

Die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Werte für die Dorsalwandlänge lagen bei allen Klauen im Bereich von 8 cm, also innerhalb der von Toussaint Raven (1985) empfohlenen Bandbreite für die durch die Klauenpflege einzustellende Dorsalwandlänge (7.5 cm plus 5 mm bis 7 mm Sohlendicke), oder innerhalb derjenigen von Tsuka et al. (2014) (7.8 cm bis 8 cm). Einzig Archer et al. (2015) lagen mit ihrer Empfehlung von 8.5 cm bis 9 cm Dorsalwandlänge (je nach Alter der Tiere) höher. Die in der hier vorgelegten Untersuchung nach Klauenpflege gemessenen Dorsalwandlängen liegen höher als nach Cardona Gavaldon (2018). Die Dorsalwandlänge und die Klauenabdruckfläche korrelierten in der hier vorgelegten Untersuchung positiv. Es fällt auf, dass die Mehrheit der 28 Versuchskühe in die nach Kehler und Sohr (2000) schwerste Gewichtsklasse und in die beiden oberen Altersklassen fielen. Dies passt wiederum zu den eher grossen Dorsalwandlängen, welche in der vorliegenden Arbeit im Mittel gefunden wurden. Der gleichfalls gefundene positive Zusammenhang zwischen längerer Dorsalwand und spitzerem Klauenwinkel mit einem in die Ballenregion verlagerten Gliedmassenschwerpunkt unterstreicht die bevorzugte Entstehung von Sohlengeschwüren bei zu langen und spitzgewinkelten Klauen (Kümper, 1997; Lischer, 2014). Die Korrektur dieser Fehlstellungen durch das „Aufrichten“ der Klauen (Gerwing, 2003) im Rahmen der funktionellen Klauenpflege ist demnach äusserst wichtig zur Prophylaxe von Überbelastungsschäden.

Die Kühe der hier vorgelegten Untersuchung zeigten bei der Ausgangssituation an den Vordergliedmassen einen engeren Stand als an den Hintergliedmassen (im Mittel 27.8 cm versus 32.8 cm). Diese Ergebnisse ähneln denjenigen von Bruderer (2015), welche ebenfalls eine bodenengere Stellung der Vordergliedmassen im Vergleich zu den Hintergliedmassen feststellte (Spurbreiten im Mittel 25.7 cm versus 31.2 cm). Für das Pferd finden sich Angaben, wonach die Distanz zwischen den beiden Hufen der Vorderbeine idealerweise derjenigen zwischen den beiden Schultergelenken und diejenige zwischen den beiden Hufen der Hinterbeine idealerweise derjenigen zwischen den beiden Oberschenkeln und Sprunggelenken entsprechen sollte (Smith Thomas, 2005). Auch beim Rind verlangt eine „normale“ Gliedmassenstel-

lung, dass sich die Klauen senkrecht unter den Schultergelenken oder Hüftgelenken befinden sollen (Herring, 2014; Lischer, 2014). In einer Untersuchung an 344 Fleischrindern im Alter von 60 Monaten, bei welchen die Brustbreite und die Hüftbreite gemessen wurden, fand sich im Mittel eine deutlich grössere Hüft- (59.7 cm, \pm 3.8) als Brustbreite (51.4 cm, \pm 5.9) (Alderson, 1999). In einer weiteren Untersuchung an Holstein-Kühen wurden grössere Werte für den Abstand der beiden äussersten Punkte der Darmbeine als für die Brustbreite gefunden (55.9 cm versus 48.3 cm) (Cerqueria et al., 2013). In der Broschüre zur linearen Beschreibung der Braunvieh-Kühe der Zuchtorganisation Braunvieh-Schweiz (Braunvieh Schweiz: Exterieurbeurteilung. In: https://homepage.braunvieh.ch/documents/Broschure_Exterieurbeurteilung-D.pdf; letzter Zugriff: 16.02.2019) wird als ideale Beckenbreite ein Mass von 38 cm genannt. Dabei handelt es sich aber nicht um den Gliedmassenabstand, sondern um den Abstand zwischen den beiden Sitzbeinhöckern. Für die Brustbreite finden sich nur Skizzen, keine Zahlenangaben. Cardona Gavaldon (2018) berichtete von einer signifikanten, positiven Korrelation der Spurbreite an den Vordergliedmassen mit dem Körpergewicht der Tiere und von einer Tendenz dazu an den Hintergliedmassen. Bei den 28 hier untersuchten Kühen war für die Spurbreite an den Hintergliedmassen eine signifikante, stark positive Korrelation (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.474 *$) mit dem Körpergewicht festzustellen, für diejenige an den Vordergliedmassen allerdings nur eine schwach positive (Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson: $r = 0.174$).

In der hier vorgelegten Untersuchung wurde der Frage nachgegangen, ob es einen Zusammenhang zwischen der Spurbreite und der Lastverteilung auf die beiden Klauen einer Gliedmasse gab. Tatsächlich konnte bei der Ausgangssituation sowohl für die Vorder- als auch für die Hintergliedmassen festgestellt werden, dass bei grösserem Gliedmassenabstand tendenziell mehr Kraft auf die Innenklauen fiel. Diese Befunde unterstützen die These, dass Kühe durch den engeren Gliedmassenabstand an den Vordergliedmassen versuchen, die Innenklauen zu entlasten. Sie sprechen jedoch dagegen, dass die Innenklauen an den Vordergliedmassen deshalb überbelastet sind, weil die Kühe eben dort einen engeren Gliedmassenabstand aufweisen. Dies passt auch zur Tatsache, dass Kühe mit deutlich höheren Aussen- als Innenklauen an den Hintergliedmassen eine kuhhessige Stellung einnehmen, um so nämlich ihre Aussenklauen zu entlasten (Lischer et al., 2014).

Mit den Holzplättchen an den Aussenklauen der Vordergliedmassen änderte sich die Spurbreite nicht signifikant, aber bei einer Mehrheit der Tiere (bei 18 von 28) nahm sie zu. Entwe-

der war der grössere Gliedmassenabstand in x-Richtung bei diesen Tieren dadurch bedingt, dass sie sich mit den Holzplättchen an den Aussenklauen durch einen breiteren Stand besser ausbalancieren konnten, oder dadurch, dass sie bei dieser Messsituation ein weniger grosses Bedürfnis als bei der Ausgangssituation dafür verspürten, die Innenklauen zu entlasten, und die Vordergliedmassen deswegen nahe zusammen zu platzieren. Der positive Zusammenhang zwischen Spurbreite und Kraft auf der Innenklaue – wie er schon in der Ausgangssituation gefunden wurde – war nämlich auch bei den Messsituationen mit den Holzplättchen an den Aussenklauen (und auch an den Innenklauen) festzustellen. Mit den Holzplättchen an den Innenklauen nahm die Spurbreite signifikant und bei einer Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) im Vergleich zur Ausgangssituation ab. Bei dieser Messsituation war an den Innenklauen eine noch stärkere Überbelastung vorhanden als schon bei der Ausgangssituation. Es könnte also sein, dass die Kühe durch einen noch engeren Stand versuchten, die Innenklauen zu entlasten.

Durch das Anbringen eines 3 cm hohen Kothurns stiegen die Kräfte und Drücke an den „Kothurnklauen“ im Vergleich zur Ausgangssituation wie erwartet signifikant an. Auf der Aussenklaue+K der linken Vordergliedmasse lastete mehr als dreimal so viel Gewicht wie ohne Kothurn. Der mittlere und maximale Druck an dieser Klaue verdoppelte sich, und gleichzeitig nahm die Abdruckfläche zu. In der Ballenzone fielen die Veränderungen jeweils noch stärker aus. Die Innenklaue+K der linken Hintergliedmasse wurde mehr als zweieinhalbmal so stark belastet wie bei der Ausgangssituation. Der mittlere und der maximale Druck stiegen um leicht mehr als die Hälfte an. Auch bei dieser Messsituation vergrösserte sich die Klauenabdruckfläche durch den Kothurn, was die grössere Kraft auf mehr Fläche verteilte und damit zu einem weniger deutlich höheren Druck führte, als man alleine von der Kraft abgeleitet hätte erwarten können. Die Auswirkungen des Kothurns auf Kraft und Drücke waren in der Ballenzone der Innenklaue ebenfalls stärker als in der Spitzenzone. Was die ipsilaterale Partnerklaue betrifft, wurde durch den 3 cm hohen Holzkothurn bei allen 28 Kühen – und bei beiden Messsituationen mit Kothurn – eine äusserst effiziente Entlastung erreicht; und zwar fanden im Median von der Ausgangs- zu den Messsituationen mit Kothurn Kräfte- und Druckreduktionen um 99.9 % respektive 98.1 % und Reduktionen des Maximaldruckes um 99.4 % respektive um 93.8 % statt. Der Vorteil des Anbringens eines Kothurns, das heisst insbesondere die damit erzielte Entlastung einer erkrankten Klaue, konnte durch die vorliegende Arbeit folglich nachgewiesen werden. Die zu entlastende Innenklaue der Vordergliedmasse war bei 10 von 28 Tieren komplett vom Boden abgehoben. An der Hintergliedmasse hatten 7 von 28 Tieren mit der zu entlastenden Aussenklaue keinen Bodenkontakt mehr. Bei den restlichen 18

respektive 21 Tieren fielen auf die zu entlastenden Klauen mit im Mittel 0.4 kg respektive 1.1 kg (umgerechnet aus den Kräften) nur noch sehr geringe Lasten. Bei weniger als 3 cm hohen Kothurnen ist zu erwarten, dass die entlastete Klaue zunehmend wieder Gewicht aufnimmt.

Die Aussenklaue+K der linken Vordergliedmasse trug durchschnittlich 24.9 % des Körpergewichts einer Kuh, während bei der Ausgangssituation von einer Vordergliedmasse 26.5 % des Körpergewichts getragen wurden. Die Innenklaue+K der linken Hintergliedmasse trug einen Anteil von 21.8 % am gesamten Körpergewicht. Bei der Ausgangssituation war eine Hintergliedmasse mit 23.5 % des Körpergewichts belastet. Dies bedeutet, dass die «Kothurnklauen» jeweils nicht die ganze Gliedmassenlast der Ausgangssituation übernahmen, sondern ein gewisser Teil der Last von den anderen drei Gliedmassen übernommen wurde. Die Lastanteile der beiden entlasteten Klauen waren sehr klein und lagen bei 0.2 % respektive 0.4 % des gesamten Körpergewichts.

Sowohl an den Vorder- als auch an den Hintergliedmassen liess sich eine Tendenz zur Kräfteübertragung von der Gliedmasse mit dem Kothurn in Richtung kontralateraler Gliedmasse feststellen. So waren die Kräfte sowohl bei den Messsituationen linke Vordergliedmasse+K als auch linke Hintergliedmasse+K jeweils im Durchschnitt zu 47.3 % auf die linke und zu 52.7 % auf die rechte Gliedmasse verteilt. Die prozentualen Veränderungen der Kräfte an den rechten Gliedmassen lagen allerdings im Median lediglich bei plus 11.1 % (Messsituation linke Vordergliedmasse+K) respektive plus 2.6 % (Messsituation linke Hintergliedmasse+K) im Vergleich zur Ausgangssituation. Bei 18 von 28 Tieren fand im Vergleich zur Ausgangssituation an der linken Vordergliedmasse+K eine Lastreduktion und gleichzeitig an der rechten Vordergliedmasse eine Lastzunahme statt. An der linken Hintergliedmasse+K war bei 17 von 28 Tieren eine Lastreduktion im Vergleich zur Ausgangssituation festzustellen, und bei 15 dieser Tiere fand gleichzeitig dazu an der rechten Hintergliedmasse eine Lastzunahme statt. Bei 2 Tieren nahm die Last an der rechten Hintergliedmasse leicht ab. Dies kann einerseits daran liegen, dass bei diesen Tieren das von der „Kothurngliedmasse“ wegfallende Gewicht nicht von der Partnergliedmasse, sondern vom anderen Gliedmassenpaar übernommen wurde (Abb. 57), oder andererseits mit dem für jede Messung neuen Platzieren der Kühe auf den Messplatten und den damit verbundenen Gewichtsunterschieden auf einem Gliedmassenpaar zusammenhängen.

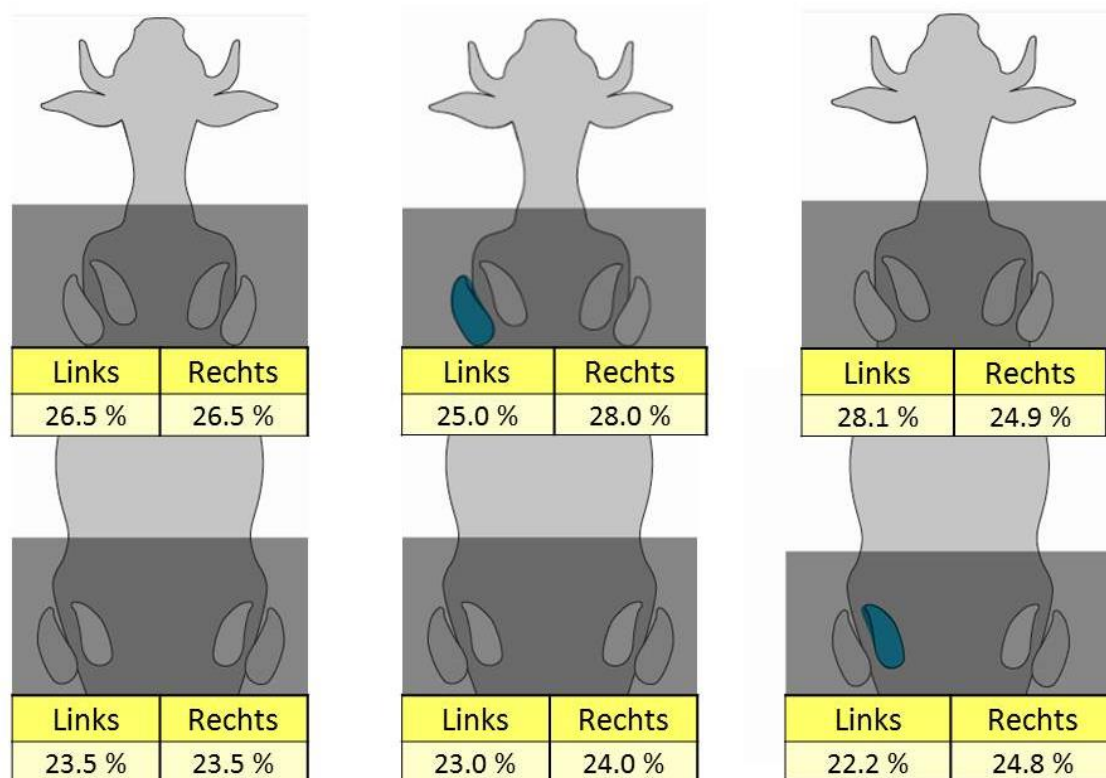
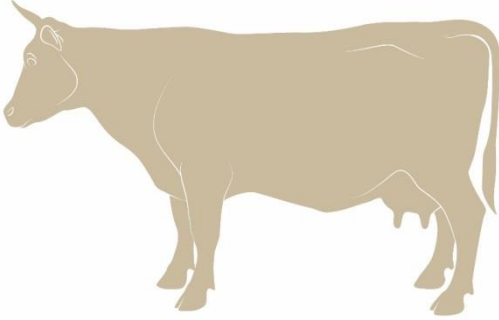


Abbildung 57: Gewichtsanteile auf allen vier Gliedmassen bei der Ausgangssituation (linke Grafik), der Messsituation linke Vordergliedmasse+K (mittlere Grafik) und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K (rechte Grafik). Die 100 % beziehen sich auf das jeweilige pro Messsituation aus der Gesamtkraft berechnete Körpergewicht der Kühe. Blau = Klaue mit Kothurn. (Abbildung modifiziert nach: Jeanne Peter, Pascal Glatzfelder, Vetcom UZH).

Mit einem Kothurn an der linken Vordergliedmasse nahm der aus den Kräfte-Mittelwerten berechnete Anteil am Gesamtgewicht auf der rechten Vordergliedmasse im Vergleich zur Ausgangssituation um genauso viele Prozentpunkte (1.5 %) zu, wie derjenige der linken Vordergliedmasse abnahm. Dies lässt vermuten, dass es nur bei den kontralateralen Gliedmassen zu einer Gewichtsverschiebung kam, nicht aber zu Gewichtsverlagerungen zwischen Vorder- und Hintergliedmassen. Unterstützt wird dies durch die Betrachtung der prozentualen Gewichtsanteile am Körpergewicht auf den beiden Gliedmassenpaaren bei der Ausgangssituation versus der Messsituation linke Vordergliedmasse+K (Tab. 51): So änderten diese nur um 0.1 Prozentpunkte (Zunahme bei den Vorder- und Abnahme bei den Hintergliedmassen). Allerdings war an den Hintergliedmassen eine signifikante Kräfteabnahme festzustellen.

Tabelle 51: Gewichtskräfte und Gewichtsanteile (bezogen auf das Gesamtgewicht) an den Vorder- und Hintergliedmassen sowie aus den Kräften berechnetes Körpergewicht der Tiere bei der Ausgangssituation (A), der Messsituation linke Vordergliedmasse+K (M KAK) und der Messsituation linke Hintergliedmasse+K (M KIK).

Arithmetische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ). Integrierte Abbildung erstellt von: Jeanne Peter, Pascal Glatzfelder, Vetcom UZH.



| | Gruppen- grösse | Gewichtskraft in N, prozentualer Gewichtsanteil | | Körpergewicht in kg (aus Kräften berechnet) |
|--------------|--------------------|--|--|--|
| | | Vordergliedmassen | Hintergliedmassen | |
| A | n = 28 | 3199.6 (σ = 319.7), 52.9 * ¹ | 2847.8 (σ = 239.9), 47.1 * ^{1,4,5} | 616.5 (σ = 54.6) * ^{6,7} |
| M KAK | n = 28 | 3175.0 (σ = 265.5), 53.0 * ² | 2811.1 (σ = 251.2), 47.0 * ^{2,4} | 610.2 (σ = 50.8) * ⁶ |
| M KIK | n = 28 | 3158.3 (σ = 253.2), 53.0 * ³ | 2796.3 (σ = 250.5), 47.0 * ^{3,5} | 607.0 (σ = 48.4) * ⁷ |

* = signifikanter Unterschied beim Mittelwertvergleich zwischen jeweils zwei mit gleichen Zahlen gekennzeichneten Werten.

Auch bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K nahm das Gewicht auf dieser Gliedmasse um 1.3 Prozentpunkte ab und dasjenige auf der rechten Gliedmasse um gleich viele Prozentpunkte zu (Abb. 57). Die prozentualen Gewichtsanteile am Körpergewicht auf den beiden Gliedmassenpaaren änderten sich jeweils nur um 0.1 Prozentpunkte (Tab. 51). An den Hintergliedmassen war jedoch – wie bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K – eine signifikante Kräftereduktion von der Ausgangssituation zur Messsituation mit Kothurn festzustellen. Bei beiden Kothurn-Situationen war allerdings bei keinem Tier eine signifikante Kräfteabnahme an den Hintergliedmassen und eine gleichzeitige signifikante Kräftezunahme an den Vordergliedmassen zu finden. Diese Mittelwertvergleiche müssen mit Vorsicht interpretiert werden, da die Messplatten bei den verschiedenen Messsituationen nicht das gleiche Körpergewicht der Kühe massen; die Gewichtskräfte waren im Vergleich zur Ausgangssituation bei beiden Kothurn-Situationen signifikant geringer (Tab. 51, Spalte ganz rechts). Diese Unstimmigkeit hängt wahrscheinlich mit dem für jede Messung neuen Positionieren der Kühe und dem nicht möglichen simultanen Messen von Vorder- und Hintergliedmassen zusammen. Es ist demnach anzunehmen, dass ein Kothurn keinen Einfluss auf die Verteilung des Körpergewichts einer Kuh auf die beiden Gliedmassenpaare hatte.

Die in der hier vorgelegten Untersuchung verwendeten klauengesunden Kühe können aus verschiedenen Gründen ihre „Kothurngliedmassen“ entlastet und dafür die Partnergliedmassen mehrbelastet haben. Einerseits kann der Kothurn als störender Fremdkörper gewirkt haben. Andererseits könnte die 3 cm längere Gliedmasse zu einer Verschiebung der Last auf die kontralaterale Gliedmasse geführt haben. Dass Kühe dazu tendierten, eine Gliedmasse weniger zu belasten, wenn sie sich an dieser unwohl fühlten – sei es aufgrund eines unangenehmen Untergrundes oder aufgrund einer Erkrankung –, konnte durch mehrere Untersuchungen gezeigt werden (Neveux et al., 2006; Pastell et al., 2006, 2010; Rushen et al., 2007; Kujala et al., 2008; Chapinal et al., 2010; Singh und Mohanty, 2012; Nechanitzky et al., 2016). Gleichzeitig wurde dann die kontralaterale Gliedmasse mehrbelastet. Die Ergebnisse aus den eben genannten Untersuchungen sprechen dafür, dass der Kothurn zu einem vergleichbaren Unwohlsein geführt haben könnte. Ob sich die Kühe mit der Zeit an den Kothurn gewöhnen und die betroffene Gliedmasse folglich nicht mehr gleich entlasten würden, wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht getestet; die Messungen fanden jeweils unmittelbar nach Anbringen der Kothurne statt. Kofler et al. (2012) fanden bei 14 von 16 untersuchten, lahmheitsfreien Kühen keine Veränderung des Gangbildes von vor der Applikation eines Kothurns zu 24 Stunden danach, womit diesen Kühen allerdings eine Eingewöhnungszeit gewährt wurde.

Nach Cutler et al. (2015) war ein durch einen Kothurn beeinflusstes Gangbild wenn, dann am ehesten durch die physikalische Erhöhung der Klaue bedingt. Diese physikalische Erhöhung der „Kothurngliedmasse“ bedeutet für eine klauenkranke Kuh eine Erleichterung, weil so die empfindliche Lederhaut aus der Belastung genommen und die geschädigte Klaue vor weiteren mechanischen Traumata geschützt wird (Cutler et al., 2012; Pedersen, S.: Bovine hoof care - treating claw horn lesions in cows. In: <https://www.vettimes.co.uk/app/uploads/wp-post-to-pdf-enhanced-cache/1/bovine-hoof-care-treating-claw-horn-lesions-in-cows.pdf>; letzter Zugriff: 04.02.2019).

Aufgrund dessen ist zu erwarten, dass sich eine klauenkranke Kuh mit einem Kothurn wohler fühlt und beide Gliedmassen wieder gleichmässiger belastet (Pastell et al., 2006); auch der Bewegungsgrad bessert sich (Maierl et al., 2013). Thomas et al. (2015) stellten allerdings fest, dass mehr klauenkranke Kühe 35 Tage nach Anbringen eines Kothurns an der kontralateralen Gliedmasse eine Lahmheit zeigten, wenn diese nur einen Kothurn erhielten, als wenn sie während dreier Tage zusätzlich noch ein Schmerzmittel verabreicht bekamen. Die Autoren vermuteten folglich auch bei klauenkranken Kühen ein mögliches Unwohlsein durch einen

Kothurn. Unklar bleibt allerdings, ob die Kühe, welche keine entzündungshemmenden Medikamente erhalten hatten, aufgrund von Unwohlsein oder aufgrund von fortbestehenden Schmerzen an der „Kothurngliedmasse“ die Partnergliedmasse überlasteten und diese damit anfälliger für Erkrankungen geworden war. Es gilt hier zu bedenken, dass das Unwohlsein infolge einer schmerzhaften Klauenerkrankung aus tierschützerischer Sicht wohl als gravierender betrachtet werden muss als das möglicherweise vorhandene Unwohlsein infolge eines Kothurns, der zur Heilung einer Klauenerkrankung beitragen soll. Insofern muss auch ein allfälliger negativer Einfluss durch einen Kothurn immer in Relation zum behandelnden Klauenleiden gesetzt werden.

Hinsichtlich der Belastung an den Klauen der kontralateralen Hintergliedmasse bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K ergab sich eine signifikante Änderung. Auf die Aussenklaue der rechten Hintergliedmasse fiel signifikant mehr Gewicht als bei der Ausgangssituation, und auf die Innenklaue dieser Gliedmasse gleichzeitig signifikant weniger. Die Lastverteilung zwischen Aussen- und Innenklaue der rechten Hintergliedmasse hatte sich von 65.7 % zu 34.3 % auf 74.0 % zu 26.0 % geändert. An der mehrbelasteten Aussenklaue wurde der Lastanstieg praktisch alleine von der Ballenzone übernommen, sodass letztere schliesslich über die Hälfte der Gliedmassenlast trug. Die Mehrbelastung der Aussenklaue der kontralateralen Hintergliedmasse wurde auch von Toussaint Raven (1998) und Müller (2018) bei einer Gewichtsverschiebung von einem Hinterbein auf das andere festgestellt. Nach Müller (2018) betrug der Anteil der mehrbelasteten Aussenklaue an der Gliedmassenpaarlast auf dem Höhepunkt der Gewichtsverschiebung 64.0 % im Gegensatz zu 36.0 % bei gleichmässiger Gliedmassenbelastung. In der hier vorgelegten Untersuchung stieg bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K der Anteil der kontralateralen Aussenklaue an der Gliedmassenpaarlast von 32.8 % auf 39.0 % an.

Bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K wurde bei 17 von 28 Tieren an der kontralateralen Aussenklaue eine grössere Kraft registriert als bei der Ausgangssituation. Das Verhältnis der Kräfte zwischen Aussen- und Innenklaue der kontralateralen Gliedmasse veränderte sich allerdings nicht signifikant von 29.9 % zu 70.1 % bei der Ausgangssituation auf 31.6 % zu 68.4 % bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Die Innenklaue blieb an der kontralateralen Gliedmasse also nach wie vor die mehrbelastete Klaue, wurde allerdings durch den Kothurn keinem noch grösseren Überbelastungsrisiko ausgesetzt. Ein Kothurn an den Vordergliedmassen scheint für die Partnergliedmasse also weniger schädlich zu sein als

ein Kothurn an den Hintergliedmassen. Bei letzteren sollte insbesondere die Aussenklaue der Partnergliedmasse regelmässig auf Anzeichen einer Überbelastung (Entlastungshaltungen und Druckempfindlichkeit) untersucht werden.

In der hier vorgelegten Untersuchung war mit einem Kothurn an der Aussenklaue der linken Vordergliedmasse im Vergleich zur Ausgangssituation keine signifikante Änderung des Belastungsverhältnisses zwischen linker und rechter Hintergliedmasse festzustellen. Umgekehrt wurde bei der Messsituation linke Hintergliedmasse+K etwas mehr Gewicht von der linken und signifikant weniger Gewicht von der rechten Vordergliedmasse getragen als bei der Ausgangssituation. Es gab somit eine Tendenz zur Kräfteübertragung auf die ipsilaterale Vordergliedmasse. Dort war bei einer Mehrheit der Tiere an der Aussenklaue eine signifikante Kräftezunahme zu verzeichnen: Die Lastverteilung zwischen Aussen- und Innenklaue änderte von 29.9 % zu 70.1 % in der Ausgangssituation auf 37.7 % zu 62.3 % in der Messsituation linke Hintergliedmasse+K. Dies bekräftigt die zuvor erwähnte vermehrte Lastaufnahme der Aussenklaue an der tendenziell ebenfalls stärker belasteten rechten Vordergliedmasse bei der Messsituation linke Vordergliedmasse+K. Wenn eine Vordergliedmasse mehr Last tragen musste (Abb. 57), schien jeweils die Aussenklaue diese Last zu übernehmen. Dies ist insofern positiv, als dass die Innenklaue nicht noch stärker belastet und mehr gefährdet wird. Der Befund, dass es am Vorderbein nicht zu einem noch unausgeglicheneren Lastverhältnis zu Lasten der Innenklaue kam, leistet einen Beitrag zum Verständnis der Biomechanik und der Reaktionsmuster der Vordergliedmassen bei Belastung.

Festzuhalten gilt es, dass Kühe – entgegen der Schlussfolgerung von Neveux et al. (2006) – im Stande zu sein scheinen, das Körpergewicht in beide Richtungen zu verschieben, das heisst von den Vorder- auf die Hintergliedmassen und umgekehrt. Es hat aber den Anschein, dass die Kühe ihren Körperschwerpunkt möglichst am gleichen Ort behalten wollen und dass sie deshalb im anderen Gliedmassenpaar – wenn dann – die Gewichtsverteilung etwas zu Lasten der ipsilateralen Gliedmasse ändern. Gleichzeitig mit der Gewichtsverlagerung von der „Kothurngliedmasse“ auf die kontralaterale Partnergliedmasse entsteht somit eine diagonale Lastübertragung. Diese wurde von Coulmance et al. (1979) auch für Katzen beschrieben (unter dem Begriff der *diagonal stance response* [diagonale Stellungsantwort]). Diese Autoren konnten aufzeigen, dass bei Entlastung einer bestimmten Gliedmasse das Körpergewicht einer Katze jeweils zu über 90 % von der kontralateralen Partnergliedmasse und der ipsilateralen Gliedmasse des anderen Gliedmassenpaares übernommen und die kontralaterale Gliedmasse

des anderen Gliedmassenpaares bewusst entlastet wurde. Durch diese Anpassungen werde der Körperschwerpunkt der Tiere am wenigsten geändert. Gleichzeitig betonten Coulmance et al. (1979) aber, dass die Körperbalance individuell sei und jedes Tier einen eigenen bevorzugten Schwerpunkt habe und demnach auch unterschiedliche Reaktionsmuster bei der Gewichtsverlagerung existieren. Dies könnte erklären, weshalb nicht alle 28 Kühe gleichermassen auf die Kothurne reagierten.

An den beiden „Kothurnklauen“ stiegen auch die Maximaldrücke signifikant an, und zwar auf gleich hohe (Vordergliedmassen) oder höhere Werte (Hintergliedmassen) als diejenigen an den mehrbelasteten Klauen der Partnergliedmassen. Wenn man bedenkt, dass der gewichtstragende Klauenuntergrund in der Regel kleiner ist als die Kothurnfläche, können die Maximaldrücke an diesen Klauen noch grösser sein als die an der Kothurnfläche gemessenen. Daher ist es zu empfehlen, eine „Kothurnklaue“ regelmässig auf Schmerzhaftigkeit zu überprüfen und einen Kothurn gegebenenfalls vorzeitig zu entfernen.

An den Vordergliedmassen änderte sich die Spurbreite durch das Anbringen eines Kothurns an der Aussenklaue der linken Gliedmasse nicht signifikant. Allerdings war bei der Mehrheit der Tiere (bei 19 von 28) eine Zunahme der Spurbreite festzustellen. Ein breiterer Stand im Vergleich zur Ausgangssituation liesse sich dadurch erklären, dass die Kühe mit einem Kothurn an der Aussenklaue – zur Entlastung der Innenklaue – weniger das Bedürfnis hatten, durch einen engen Stand die Innenklauen zu entlasten. Die Spurbreite könnte aber auch deswegen grösser geworden sein, weil sich durch den Kothurn an der Aussenklaue der Gliedmassenschwerpunkt der linken Vordergliedmasse weiter nach lateral verschoben hatte und somit die Spurbreite, definiert als Abstand zwischen den beiden Gliedmassenschwerpunkten, etwas grösser wurde. Zu dieser Theorie passen würde, dass an den Hintergliedmassen durch das Anbringen eines Kothurns an die Innenklaue der linken Gliedmasse die Spurbreite signifikant abnahm. Der Schwerpunkt der linken Hintergliedmasse war dabei weiter medial platziert und könnte so die Spurbreite verkleinert haben. Allerdings könnte die kleinere Spurbreite auch daher rühren, dass die Kühe keinen gleich breiten Stand wie noch bei der Ausgangssituation mehr benötigten, um die Aussenklauen zu entlasten.

Bei den im Rahmen der vorgelegten Arbeit untersuchten 28 Milchkühen wurden folglich an den gepflegten Klauen von Vorder- und Hintergliedmassen mit bisherigen Untersuchungen übereinstimmende Kräfte- und Druckverteilungen vorgefunden. Durch das Anbringen von 3 mm hohen Holzplättchen konnte erstmals gezeigt werden, wie eine Entlastung der Innen-

klauen der Vordergliedmassen durch die Klauenpflege erreicht werden kann. Diese Erkenntnis kann nun bei der funktionellen Klauenpflege eingesetzt werden, um den Innenklauen die Rolle der Hauptlastträger zu nehmen. Aufschlussreich wäre es, bei einer weiteren Versuchstiergruppe die Klauen der Vordergliedmassen dementsprechend zu pflegen und anschliessend auf Kraft- und Druckmessplatte zu vermessen. Dadurch würden die hier möglicherweise durch die Simulation mittels Holzplättchen bedingten Verfälschungen (aufgrund der unnatürlichen Flächen und des Klebebands) ausgeschaltet. Allerdings wären die Höhenunterschiede wohl weniger zu standardisieren als mit den Plättchen.

Die Untersuchungen mit den Kothurnen quantifizierten erstmals die Kräfte- und Druckzunahmen an den „Kothurnklauen“ und wiesen die komplette Entlastung der Partnerklauen nach. Sie zeigten zudem auf, dass durch einen Kothurn auch eine schädigende Wirkung, nämlich auf die Partnergliedmasse, zu befürchten ist, und dies besonders an den Aussenklauen der Hintergliedmassen, welche weitaus am häufigsten von Klauenerkrankungen betroffen sind. Bezüglich der Gewichtsverlagerungen, die durch einen Kothurn an einer erkrankten Gliedmasse entstehen, müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

8. Literaturverzeichnis

Agostinho, F.S., Rahal, S.C., Araujo, F.A., Conceicao, R.T., Hussni, C.A., El-Warrak, A.O., Monteiro, F.O., 2012. Gait analysis in clinically healthy sheep from three different age groups using a pressure-sensitive walkway. *BMC Veterinary Research* 8, 87.

Alderson, G.L.H., 1999. The development of a system of linear measurements to provide an assessment of type and function of beef cattle. *Animal Genetic Resources Information Bulletin* 25, 45-55.

Almeida, P.E., Mullineaux, D.R., Raphael, W., Wickens, C., Zanella, A.J., 2007. Early detection of lameness in heifers with hairy heel warts using a pressure plate. *Animal Welfare* 16, 135-137.

Alsaad, M., Huber, S., Beer, G., Kohler, P., Schupbach-Regula, G., Steiner, A., 2017. Locomotion characteristics of dairy cows walking on pasture and the effect of artificial flooring systems on locomotion comfort. *Journal of Dairy Science* 100, 8330-8337.

Alsleben, B., Russke, A., Wrede, J., Hamann, H., Distl, O., 2003. Messung der Druckverteilung unter den Klauen bei Rindern der Rasse Deutsche Holsteins in den ersten zwei Lebensjahren. *Der praktische Tierarzt* 84, 232-240.

Andersson, L., Lundström, K., 1981. The influence of breed, age, body weight and season on digital diseases and hoof size in dairy cows. *Zentralblatt für Veterinärmedizin Reihe A* 28, 141-151.

Archer, S.C., Newsome, R., Dibble, H., Sturrock, C.J., Chagunda, M.G., Mason, C.S., Huxley, J.N., 2015. Claw length recommendations for dairy cow foot trimming. *Veterinary Record* 177, 222.

Barker, Z.E., Leach, K.A., Whay, H.R., Bell, N.J., Main, D.C., 2010. Assessment of lameness prevalence and associated risk factors in dairy herds in England and Wales. *Journal of Dairy Science* 93, 932-941.

Baumgartner, C., 1988. Untersuchungen über Klauenmasse als Hilfsmerkmale für die Selektion auf Klauengesundheit an Töchtergruppen von Deutschen Fleckviehbullen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Becker, J., Steiner, A., Kohler, S., Koller-Bahler, A., Wuthrich, M., Reist, M., 2014. Lameness and foot lesions in Swiss dairy cows: I. Prevalence. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 156, 71-78.

Bell, N.J., 2015. Evidence-based claw trimming for dairy cattle. *Veterinary Record* 177, 220-221.

Benz, B., Wandel, H., Jungbluth, T., 2002. Yielding walking areas in loose house systems. In: Shearer, J.K. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants*, Orlando, Florida, USA, 280-282.

- Bergsten, C.**, 2004. Healthy feet requires cow comfort 24 hours. In: Zemljic B. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants, Maribor, Slowenien, 186-191.
- Besancon, M.F.**, Conzernius, M.G., Derrick, T.R., Ritter, M.J., 2003. Comparison of vertical forces in normal greyhounds between force platform and pressure walkway measurement systems. Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology 3, 153-157.
- Blowey, R.**, 1998a. Kapitel: Klauenpflege. In: Blowey, R. Klauenpflege bei Rindern und Behandlung von Lahmheit. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 35-44.
- Blowey, R.**, 1998b. Kapitel: Häufige Klauenerkrankungen - Verbände, Blöcke und Schuhe. In: Blowey, R. Klauenpflege bei Rindern und Behandlung von Lahmheit. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 63-66.
- Blowey, R.**, 2015. Letters: Claw trimming of dairy cattle. Veterinary Record 177, 319.
- Blowey, R.**, Girdler, C., Thomas, C., 1999. Persistence of foot blocks used in the treatment of lame cows. Veterinary Record 144, 642-643.
- Blowey, R.**, Inman, B., 2012. Is there a case for reassessing hoof-trimming protocols? Veterinary Record 171, 592-593.
- Blowey, R.**, Inman, B., 2013. Pedal bone dimensions in relation to hoof trimming protocols. In: Whay, B., Hockenhull, J. (Hrsg.): Proceedings of the 17th International Symposium & 9th Conference on Lameness in Ruminants, Bristol, Grossbritannien, 257.
- Breuer, D.**, 1963. Technovit und Klauenbeschlag. Tierärztliche Umschau 18, 545-547.
- Bruderer, A.**, 2015. Klauenbelastung von Jungrindern und Kühen beim Stehen auf verschiedenen Gummimatten. Inaugural-Dissertation, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich.
- Bruijnis, M.R.**, Beerda, B., Hogeveen, H., Stassen, E.N., 2012. Assessing the welfare impact of foot disorders in dairy cattle by a modeling approach. Animal 6, 962-970.
- Bruijnis, M.R.**, Hogeveen, H., Stassen, E.N., 2010. Assessing economic consequences of foot disorders in dairy cattle using a dynamic stochastic simulation model. Journal of Dairy Science 93, 2419-2432.
- Brunner, W.**, Kurz, B., Diebschlag, W., 1983. Kapazitives Druckverteilungsmesssystem für hohe Messstellendichte. Biomedizinische Technik 28, 221-224.
- Bryan, M.**, Tacoma, H., Hoekstra, F., 2012. The effect of hindclaw height differential and subsequent trimming on lameness in large dairy cattle herds in Canterbury, New Zealand. New Zealand Veterinary Journal 60, 349-355.
- Büchlmann, E.**, 1948. Der Hufkeil bei der Behandlung von Lahmheit. Wiener Tierärztliche Monatsschrift 35, 114.
- Burgi, K.**, Cook, N.B., 2008. Adequacy of trimming procedures of rear feet collected from a slaughterhouse. In: Organisation Committee (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Symposium & the 7th Conference on Lameness in Ruminants, Kuopio, Finnland, 195.

Campbell, J.R., Greenough, P.R., Petrie, L., 2000. The effects of dietary biotin supplementation on vertical fissures of the claw wall in beef cattle. *Canadian Veterinary Journal* 41, 690-694.

Cardona Gavaldon, N., 2018. Kraftverteilung unter den Klauen laktierender Milchkühe bei unterschiedlicher Standfläche vor und nach der Klauenpflege. Inaugural-Dissertation, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich.

Carvalho, V., Nääs, I.A., Bucklin, R.A., Shearer, J.K., Shearer, L., Massafera JR., V., Souza, S.R.L. de, 2006. Effects of trimming on dairy cattle hoof weight bearing surfaces and pressure distributions. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science* 43, 518-525.

Carvalho, V.C. de, Alencar Nääs, I. de, Mollo Neto, M., Souza, S.R.L. de, 2009. Measurement of pig claw pressure distribution. *Biosystems Engineering* 103, 357-363.

Carvalho, V.R., Bucklin, R.A., Shearer, J.K., Shearer, L.C., 2002. A preliminary study of weight-bearing surfaces and shifting of forces under the hooves of dairy cattle. In: Shearer, J.K. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants*, Orlando, Florida, USA, 206-207.

Carvalho, V.R.C., Bucklin, R.A., Shearer, J.K., Shearer, L., 2005. Effects of trimming on dairy cattle hoof weight bearing and pressure distributions during the stance phase. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48, 1653-1659.

Cerqueira, J.O.L., Araujo, J.P.P., Cantalapiedra, J., Blanco-Penedo, I., Niza-Ribeiro, J.J.R., 2013. Relationship between zoometric measurements in Holstein-Friesian cow and cubicle size in dairy farms. *International Journal of Morphology* 31, 55-63.

Chapinal, N., Passillé, A.M. de, Rushen, J., 2009. Weight distribution and gait in dairy cattle are affected by milking and late pregnancy. *Journal of Dairy Science* 92, 581-588.

Chapinal, N., Passillé, A.M. de, Rushen, J., Wagner, S., 2010. Automated methods for detecting lameness and measuring analgesia in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 93, 2007-2013.

Chapinal, N., Tucker, C.B., 2012. Validation of an automated method to count steps while cows stand on a weighing platform and its application as a measure to detect lameness. *Journal of Dairy Science* 95, 6523-6528.

Clark, C.R., Petrie, L., Waldner, C., Wendell, A., 2004. Characteristics of the bovine claw associated with the presence of vertical fissures (sandcracks). *Canadian Veterinary Journal* 45, 585-593.

Clarkson, M.J., Downham, D.Y., Faull, W.B., Hughes, J.W., Manson, F.J., Merritt, J.B., Murray, R.D., Russell, W.B., Sutherst, J.E., Ward, W.R., 1996. Incidence and prevalence of lameness in dairy cattle. *Veterinary Record* 138, 563-567.

Cohen, J., 1992. A power primer. *Quantitative Methods in Psychology* 112, 155-159.

Colam-Ainsworth, P., Lunn, G.A., Thomas, R.C., Eddy, R.G., 1989. Behaviour of cows in cubicles and its possible relationship with laminitis in replacement dairy heifers. *Veterinary Record* 125, 573-575.

Cook, N.B., 2003. Prevalence of lameness among dairy cattle in Wisconsin as a function of housing type and stall surface. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 223, 1324-1328.

Correa-Valencia, N.M., Castano-Aguilar, I.R., Shearer, J.K., Arango-Sabogal, J.C., Fecteau, G., 2018. Frequency and distribution of foot lesions identified during cattle hoof trimming in the Province of Antioquia, Colombia (2011-2016). *Tropical Animal Health and Production* 51, 1-8.

Coulmance, M., Gahéry, Y., Massion, J., Swett, J.E., 1979. The placing reaction in the standing cat: A model for the study of posture and movement. *Experimental Brain Research* 37, 265-281.

Cramer, G., Lissemore, K.D., Guard, C.L., Leslie, K.E., Kelton, D.F., 2008. Herd- and cow-level prevalence of foot lesions in Ontario dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 91, 3888-3895.

Cutler, J.H., 2012. Welfare in dairy cattle: Epidemiologic approaches for detection and treatment of lameness. PhD-Thesis, Ontario Veterinary College, University of Guelph.

Cutler, J.H., Shearer, J.K., Kelton, D.F., Cramer, G., Gorden, P.J., Millman, S.T., 2015. An observational study of the effects of therapeutic hoof blocks on the locomotion, behavior, and production of healthy dairy cattle. *Journal of Applied Animal Welfare Science* 18, 1-12.

Dippel, S., Dolezal, M., Brenninkmeyer, C., Brinkmann, J., March, S., Knierim, U., Winckler, C., 2009. Risk factors for lameness in freestall-housed dairy cows across two breeds, farming systems, and countries. *Journal of Dairy Science* 92, 5476-5486.

Distl, O., Kräusslich, H., Mair, A., Spielmann, C., Diebschlag, W., 1990. Computergestützte Analyse von Druckverteilungsmessungen an Rinderklauen. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift* 97, 474-479.

Dyer, R.M., Neerchal, N.K., Tasch, U., Wu, Y., Dyer, P., Rajkondawar, P.G., 2007. Objective determination of claw pain and its relationship to limb locomotion score in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 90, 4592-4602.

Edmonson, A.J., Lean, I.J., Weaver, L.D., Farver, T., Webster, G., 1989. A body condition scoring chart for holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* 72, 68-78.

Ettema, J.F., Østergaard, S., 2006. Economic decision making on prevention and control of clinical lameness in Danish dairy herds. *Livestock Science* 102, 92-106.

Fessl, L., 1980. Die Normalklaue des Oesterreichischen Fleckviehrindes - Grössen- und Formbestimmung und deren Bedeutung für Klauenerkrankungen und Stallbau. Habilitationsschrift, Veterinärmedizinische Universität Wien.

Feszl, L., 1968. Biometrische Untersuchungen der Bodenfläche der Rinderklauen und die Belastungsverteilung auf die Extremitätenpaare. Zentralblatt für Veterinärmedizin Reihe A 15, 844-860.

Fiedler, A., 2000. Lahmheitsbehandlung der neuen Generation - Der Klotz als sinnvolle Entlastungsmöglichkeit. Milchpraxis 2/2000, Sonderdruck, 1-4.

Fiedler, A., 2004. Funktionelle Klauenpflege als Grundlage der tierärztlichen Therapie. Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere 32, 298-305.

Fiedler, A., 2012. Funktionelle Klauenpflege als Grundlage der tierärztlichen Diagnostik und Therapie. Der praktische Tierarzt 93, 26-36.

Fiedler, A., Maierl, J., Nuss, K., 2004. Kapitel 3: Funktionelle Klauenpflege. In: Fiedler, A., Maierl, J., Nuss, K. (Hrsg.), Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. 1. Auflage. Schattauer, Stuttgart, 44-62.

Fiedler, A., Maierl, J., Nuss, K., 2019. Kapitel 3: Funktionelle Klauenpflege. In: Fiedler, A., Maierl, J., Nuss, K. (Hrsg.), Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 59-83.

Galindo, F., Broom, D.M., 2000. The relationships between social behaviour of dairy cows and the occurrence of lameness in three herds. Research in Veterinary Science 69, 75-79.

Gerwing, T.H., 2003. Beeinflussung der Lastverteilung durch Klauenpflege innerhalb der Einzelklauen und der Klauenpaare der Hintergliedmassen von schwarzbunten Milchkühen der Rasse Deutsche Holsteins. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.

Geyer, H., Räber, M., Fürst, A., Warzecha, C., 2014. Kapitel 2: Anatomie der Rinderklaue. In: Lischer, C., Steiner, A., Geyer, H., Friedli, K., Ossent, P., Nuss, K., Klauenpflege. Edition Imz, Zollikofen, 13-32.

Gomes-Costa, M., Roupa, I., Pequito, M., Prazeres, J., Gaivão, M., Abrantes, J., Clayton, H.M., 2015. The use of pressure plates for static center of pressure analysis in horses. Journal of Equine Veterinary Science 35, 315-320.

Goonewardene, L.A., Hand, R.K., 1995. A study of hoof cracks in grazing cattle - association of age, weight and fatness. Canadian Journal of Animal Science 75, 25-29.

Goonewardene, L.A., Hand, R.K., Wang, Z., Al-Ani, L., Carlyon, R., Okine, E.K., Yang, R.C., 2004. A study on the occurrence of sand cracks in commercial beef cattle. Journal of Animal and Veterinary Advances 3, 864-871.

Greenough, P.R., 1997. Kapitel 9: Claw care. Methyl methacrylate and claw prosthetics. In: Greenough, P.R., Weaver, A.D., 1997. Lameness in Cattle. W.B. Saunders Company, Philadelphia, 137-142.

Greenough, P.R., Weaver, A.D., Broom, D.M., Esslemont, R.J., Galindo, F.A., 1997. Kapitel 1: Basic concepts of bovine lameness. In: Greenough, P.R., Weaver, A.D. (Hrsg.), 1997. Lameness in Cattle. W.B. Saunders Company, Philadelphia, 3-13.

Hand, R.K., Goonewardene, L.A., Yaremcio, B.J., Westra, R., 1992. A study on the prevalence of cracked claws among beef cows. Canadian Journal of Animal Science 72, 165-168.

Hernandez, J., Gabarino, E.J., Shearer, J.K., Risco, C.A., Thatcher, W.W., 2007. Evaluation of the efficacy of prophylactic hoof health examination and trimming during midlactation in reducing the incidence of lameness during late lactation in dairy cows. Journal of the American Veterinary Medical Association 230, 89-93.

Herring, A.D., 2014. Kapitel 9: Health. In: Herring, A.D., Beef Cattle Production System. CABI, Wallingford / Boston, 160-190.

Hinterhofer, C., Ferguson, J.C., Apprich, V., Haider, H., Stanek, C., 2005a. A finite element model of the bovine claw under static load for evaluation of different flooring conditions. New Zealand Veterinary Journal 53, 165-170.

Hinterhofer, C., Zöschner, M., Gabler, C., Stanek, C., 2005b. The hardness of horn in different segments of the bovine claw. Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift 118, 334-340.

Hoffmann, L. (Numo Systems AG), 2018. Persönliche Mitteilung, 16.10.2018.

Horseman, S.V., Whay, H.R., Huxley, J.N., Bell, N.J., Mason, C.S., 2013. A survey of the on-farm treatment of sole ulcer and white line disease in dairy cattle. The Veterinary Journal 197, 461-467.

Hubert, C., 1993. Einfluss von Rasse, Aufstallungssystem und Klauenpflege auf die Druckverteilung unter Rinderklauen sowie die Klauenhornstärke und -feuchte. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Hubert, C., Distl, O., 1994. Untersuchung der Druckverteilung unter Rinderklauen bei den Rassen Deutsche Schwarzbunte und Deutsches Fleckvieh. Züchtungskunde 66, 327-338.

Huth, C., 2004. Analyse der Entwicklung von Körper- und Klauenmassen sowie der Druckverteilung unter den Klauen bei Jungrindern verschiedener Rassen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.

Huth, C., Russke, A., Alsleben, B., Hamann, H., Distl, O., 2004. Körper- und Klauenmasse sowie Druckverteilung unter den Klauen bei Kälbern verschiedener Rinderrassen. Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift 117, 316-326.

Huth, C., Russke, A., Alsleben, B., Hamann, H., Distl, O., 2005. Körper- und Klauenmasse sowie Druckverteilung unter den Klauen bei Färsen verschiedener Rinderrassen. Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift 118, 150-159.

Huxley, J.N., 2013. Impact of lameness and claw lesions in cows on health and production. Livestock Science 156, 64-70.

Kehler, W., 1998. Fehler im System - Warum wir im Laufstall der Klauenprobleme nicht Herr werden. Deutsche Landwirtschaftliche Zeitung, Sonderdruck, 2-4.

Kehler, W., Gerwing, T.H., 2004. Effects of functional claw trimming on pressure distribution. In: Zemljic, B. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants Symposium, Maribor, Slowenien, 103-104.

Kehler, W., Sohrt, T., 2000. Standard measurements of the normal hind claw of Holstein Friesian cows: the relation between the internal anatomical structure and the horn capsule. In: Organisation Committee (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Symposium on Disorders of the Ruminant digit and 3rd International Conference on Bovine Lameness, Parma, Italien, 260-261.

Kloosterman, P., 1997. Kapitel 9: Claw care. In: Greenough, P.R., Weaver, A.D. (Hrsg.), 1997. Lameness in Cattle. W.B. Saunders Company, Philadelphia, 123-137.

Kofler, J., Bübber, P., Hennigner, W., 1999. Ultrasonographic imaging and thickness measurement of the sole horn and the underlying soft tissue layer in bovine claws. The Veterinary Journal 157, 322-331.

Kofler, J., Mangweth, G., Altenhofer, C., Weber, A., Gasser, C., Schramel, J.P., Tichy, A., Peham, C., 2012. Messung der Bewegung lahmheitsfreier Kühe mittels Accelerometer im Schritt und Vergleich der Beschleunigungswerte nach Kleben eines Klotzes. Wiener Tierärztliche Monatsschrift 99, 3-12.

Kofler, J., Pesenhofer, R., Landl, G., Sommerfeld-Stur, I., Peham, C., 2013. Langzeitkontrolle der Klauengesundheit von Milchkühen in 15 Herden mithilfe des Klauenmanagers und digitaler Kennzahlen. Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere 41, 31-44.

Krebs, N., Berry, S.L., Tucker, C.B., 2011. Restless behavior increases over time, but not with compressibility of the flooring surface, during forced standing at the feed bunk. Journal of Dairy Science 94, 97-105.

Kujala, M., Pastell, M., Soveri, T., 2008. Use of force sensors to detect and analyse lameness in dairy cows. Veterinary Record 162.

Kümper, H., 1997. Biomechanische Grundlagen einer funktionellen Klauenpflege beim Rind. Der praktische Tierarzt 78, 880-888.

Lascelles, B.D.X., Findley, K., Correa, M., Marcellin-Little, D., Roe, S., 2007. Kinetic evaluation of normal walking and jumping in cats, using a pressure-sensitive walkway. Veterinary Record 160, 512-516.

Lascelles, B.D.X., Roe, S.C., Smith, E., Reynolds, L., Markham, J., Marcellin-Little, D., Bergh, M.S., Budsberg, S.C., 2006. Evaluation of a pressure walkway system for measurement of vertical limb forces in clinically normal dogs. American Journal of Veterinary Research 67, 277-282.

Laven, L.J., Margerison, J.K., Laven, R.A., 2012. Validation of a portable ultrasound machine for estimating sole thickness in dairy cattle in New Zealand. New Zealand Veterinary Journal 60, 123-128.

Laven, R.A., Lawrence, K.E., Weston, J.F., Dowson, K.R., Stafford, K.J., 2008. Assessment of the duration of the pain response associated with lameness in dairy cows, and the influence of treatment. *New Zealand Veterinary Journal* 56, 210-217.

Le Quang, T., Maitre, P., Roger, T., Viguier, E., 2007. The GAITRite® system for evaluation of the spatial and temporal parameters of normal dogs at a walk. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 10, 109-110.

Lischer, C., 2000. Sohlengeschwüre beim Rind - Pathogenese und Heilungsverlauf. Habilitationsschrift, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Zürich.

Lischer, C., 2014. Kapitel 3: Biomechanik. In: Lischer, C., Steiner, A., Geyer, H., Friedli, K., Ossent, P., Nuss, K., Klauenpflege. Edition Imz, Zollikofen, 33-46.

Lischer, C., Nuss, K., Pijl, R., 2014. Kapitel 6: Funktionelle Klauenpflege. In: Lischer, C., Steiner, A., Geyer, H., Friedli, K., Ossent, P., Nuss, K., Klauenpflege. Edition Imz, Zollikofen, 71-78.

Litzke, L.-F., Rau, B., 2012. Kapitel 19: Funktionelle Klauenpflege beim Rind. In: Litzke, L.-F., Rau, B., *Der Huf: Lehrbuch des Hufbeschlages begründet von Hermann Ruthe*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 326-353.

Maierl, J., Fiedler, A., Doepfer, D., Haas, J., Höfler, R., Kellhuber, H., Moosbauer, M., Warmedinger, H., 2013. Wedge-shaped blocks, wood and flexible, advance a good locomotion performance. In: Whay, B., Hockenhull, J. (Hrsg.): 17th International Symposium & 9th Conference on Lameness in Ruminants, Bristol, Grossbritannien, 144-145.

Mair, A., 1989. Untersuchung der Druckverteilung unter Rinderklauen mit bildverarbeitenden Methoden. Inaugural-Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München.

Mair, A., Spielmann, C., Diebschlag, W., Kräusslich, H., Graf, F., Distl, O., 1988. Druckverteilungsmessungen an der Sohle von Rinderklauen - Grundlegende Untersuchungen mit einem neuartigen Messsystem. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift* 95, 325-328.

Manson, F.J., Leaver, J.D., 1988. The influence of dietary protein intake and of hoof trimming on lameness in dairy cattle. *Animal Production* 47, 191-199.

Meijer, E., Bertholle, C.P., Oosterlinck, M., van der Staay, F.J., Back, W., van Nes, A., 2014. Pressure mat analysis of the longitudinal development of pig locomotion in growing pigs after weaning. *BMC Veterinary Research* 10, 37.

Meyer, S.W., Weishaupt, M.A., Nuss, K.A., 2007. Gait pattern of heifers before and after claw trimming: a high-speed cinematographic study on a treadmill. *Journal of Dairy Science* 90, 670-676.

Muggli, E., Sauter-Louis, C., Braun, U., Nuss, K., 2011. Length asymmetry of the bovine digits. *The Veterinary Journal* 188, 295-300.

Muggli, E., Weidmann, E., Kircher, P., Nuss, K., 2016. Radiographic Measurement of Hindlimb Digit Length in Standing Heifers. *Anatomia, Histologia, Embryologia* 45, 463-468.

Müller, J., 2018. Einfluss von Gliedmassenstellung und Gewichtsverlagerung auf die Klauenbelastung der Hinterbeine von Milchkühen. Inaugural-Dissertation, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich.

Müller, K.R., Laven, R.A., Laven, L.J., 2018. Comparison of orthopaedic hoof blocks for the treatment of lame cattle under New Zealand pasture conditions in regard to wear and block duration. In: WBC 2018 Organizing Committee (Hrsg.), Abstract Book, World Buiatrics Congress, Sapporo, Japan, 85-86.

Mülling, C., Bragulla, H., Budras, K.-D., 1994. Strukturelle Faktoren mit Einfluss auf die Hornqualität und Prädilektionsstellen für Erkrankungen an der Fussungsfläche der Rinderklaue. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 136, 49-57.

Mülling, C.K.W., Pesenhofer, R., 2018. Zuviel Druck macht die Klaue krank. Landwirt - Die Fachzeitschrift für die bäuerliche Familie - Spezial, September 2018, 8-11.

Murray, R.D., Downham, D.Y., Clarkson, M.J., Faull, W.B., Hughes, J.W., Manson, F.J., Merritt, J.B., Russell, A.M., Sutherst, J.E., Ward, W.R., 1996. Epidemiology of lameness in dairy cattle - description and analysis of foot lesions. Veterinary Record 138, 586-591.

Nacambo, S., Hassig, M., Lischer, C., Nuss, K., 2007. Difference in the length of the medial and lateral metacarpal and metatarsal condyles in calves and cows - a post-mortem study. Anatomia, Histologia, Embryologia 36, 408-412.

Nechanitzky, K., Starke, A., Vidondo, B., Muller, H., Reckardt, M., Friedli, K., Steiner, A., 2016. Analysis of behavioral changes in dairy cows associated with claw horn lesions. Journal of Dairy Science 99, 2904-2914.

Neveux, S., Weary, D.M., Rushen, J., Von Keyserlingk, M.A.G., Passillé, A.M. de, 2006. Hoof discomfort changes how dairy cattle distribute their body weight. Journal of Dairy Science 89, 2503-2509.

Newcomer, B.W., Chamorro, M.F., 2016. Distribution of lameness lesions in beef cattle: A retrospective analysis of 745 cases. Canadian Veterinary Journal 57, 401-406.

Nicol, K., Hennig, E.M., 1976. Time dependent method for measuring force distribution using a flexible mat as a capacitor. In: Komi, P.V. (Hrsg.), Biomechanics V-B. University Park Press, Baltimore, 433-440.

Nuss, K., 1988. Zur Klauengelenkresektion beim Rind: eine Analyse von 281 Fällen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Nuss, K., Fiedler, A., 2004. Kapitel 8: Nachsorge. In: Fiedler, A., Maierl, J., Nuss, K. (Hrsg.), Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. Schattauer, Stuttgart, 169-184.

Nuss, K., Kolp, E., Braun, U., Weidmann, E., Hässig, M., 2014. Klauengrösse von Schottischen Hochland-Kühen nach Weide- und Laufstallhaltung. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 156, 433-440.

Nuss, K., Paulus, N., 2006. Measurements of claw dimensions in cows before and after functional trimming: a post-mortem study. The Veterinary Journal 172, 284-292.

- Nuss, K., Sauter-Louis, C., Sigmund, B., 2011.** Measurements of forelimb claw dimensions in cows using a standardised sole thickness: a post-mortem study. *The Veterinary Journal* 190, 84-89.
- Nuss, K., Tiefenthaler, I., 2000.** Eigenschaften und klinische Anwendung gebräuchlicher Klauenkothurne. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere* 28, 125-132.
- O'Callaghan, K.A., 2002.** Lameness and associated pain in cattle - challenging traditional perceptions. *In Practice* 24, 212-219.
- O'Callaghan, K.A., Murray, R.D., Cripps, P.J., Ward, W.R., 2004.** Working practices of cattle foot trimmers used for footcare in dairy cattle compared with those of veterinary surgeons for treatment of lameness in large animal practice. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 51, 429-434.
- Oehme, B., Geiger, S.M., Grund, S., Hainke, K., Munzel, J., Mulling, C.K.W., 2018.** Effect of different flooring types on pressure distribution under the bovine claw - an ex vivo study. *BMC Veterinary Research* 14, 259.
- Oosterlinck, M., Pille, F., Back, W., Dewulf, J., Gasthuys, F., 2011.** A pressure plate study on fore and hindlimb loading and the association with hoof contact area in sound ponies at the walk and trot. *The Veterinary Journal* 190, 71-76.
- Oosterlinck, M., Pille, F., Sonneveld, D.C., Oomen, A.M., Gasthuys, F., Back, W., 2012.** Contribution of dynamic calibration to the measurement accuracy of a pressure plate system throughout the stance phase in sound horses. *The Veterinary Journal* 193, 471-474.
- Ossent, P., Peterse, D.J., Schamhardt, H.C., 1987.** Distribution of load between the lateral and medial hoof of the bovine hind limb. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 34, 296-300.
- Ouweltjes, W., Holzhauer, M., van der Tol, P.P., van der Werf, J., 2009.** Effects of two trimming methods of dairy cattle on concrete or rubber-covered slatted floors. *Journal of Dairy Science* 92, 960-971.
- Pastell, M., Hanninen, L., Passillé, A.M. de, Rushen, J., 2010.** Measures of weight distribution of dairy cows to detect lameness and the presence of hoof lesions. *Journal of Dairy Science* 93, 954-960.
- Pastell, M., Hautala, M., Poikalainen, V., Praks, J., Veermäe, I., Kujala, M., Ahokas, J., 2008.** Automatic observation of cow leg health using load sensors. *Computers and Electronics in Agriculture* 62, 48-53.
- Pastell, M., Takko, H., Gröhn, H., Hautala, M., Poikalainen, V., Praks, J., Veermäe, I., Kujala, M., Ahokas, J., 2006.** Assessing cows' welfare: weighing the cow in a milking robot. *Biosystems Engineering* 93, 81-87.
- Paulus, N., Nuss, K., 2006.** Unterschiede zwischen den Abmessungen von lateraler und medialer Klauen an den Bgln bei Jungbullen. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere* 34, 86-93.

- Peterse**, D.J., 1985. Laminitis and interdigital dermatitis and heel horn erosion. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice* 1, 83-91.
- Potterton**, S.L., Bell, N.J., Whay, H.R., Berry, E.A., Atkinson, O.C., Dean, R.S., Main, D.C., Huxley, J.N., 2012. A descriptive review of the peer and non-peer reviewed literature on the treatment and prevention of foot lameness in cattle published between 2000 and 2011. *The Veterinary Journal* 193, 612-616.
- Pyman**, 1997. Comparison of bandaging and elevation of the claw for the treatment of foot lameness in dairy cows. *Australian Veterinary Journal* 75, 132-135.
- Rogers**, C.W., Back, W., 2003. Wedge and eggbar shoes change the pressure distribution under the hoof of the forelimb in the square standing horse. *Journal of Equine Veterinary Science* 23, 306-309.
- Rousing**, T., Bonde, M., Badsberg, J.H., Sørensen, J.T., 2004. Stepping and kicking behaviour during milking in relation to response in human-animal interaction test and clinical health in loose housed dairy cows. *Livestock Production Science* 88, 1-8.
- Rushen**, J., Pombourcq, E., Passillé, A.M. de, 2007. Validation of two measures of lameness in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science* 106, 173-177.
- Russell**, A.M., Rowlands, G.J., Shaw, S.R., Weaver, A.D., 1982. Survey of lameness in British dairy cattle. *Veterinary Record* 111, 155-160.
- Rusterholz**, A., 1920. Das spezifisch-traumatische Klauensohlengeschwür des Rindes. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 62, 505-525.
- Sadiq**, M.B., Ramanoon, S.Z., Mansor, R., Syed-Hussain, S.S., Shaik Mossadeq, W.M., 2017. Prevalence of lameness, claw lesions, and associated risk factors in dairy farms in Selangor, Malaysia. *Tropical Animal Health and Production* 49, 1741-1748.
- Schmid**, T., Weishaupt, M.A., Meyer, S.W., Waldern, N., Peinen, K., Nuss, K., 2009. High-speed cinematographic evaluation of claw-ground contact pattern of lactating cows. *The Veterinary Journal* 181, 151-157.
- Schneider**, P., 1980. Einfluss des Vaters auf Gliedmassenstellung und Klauenformen sowie Abriebfestigkeit und Wassergehalt des Klauenhorns der Nachkommen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Schwarzmann**, B., Köstlin R., Nuss, K., 2007. Größenunterschiede zwischen den lateralen und medialen Zehenknochen und Klauen von Kälbern. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere* 35, 341-349.
- Scott**, G.B., 1988. Lameness and pregnancy in Friesian dairy cows. *British Veterinary Journal* 144, 273-281.
- Scott**, G.B., 1989. Changes in limb loading with lameness for a number of Friesian cattle. *British Veterinary Journal* 145, 28-38.
- Seebacher**, M., Knezevic, P., Tauffkirchen, W., Benedikter, G., Fessler, L., 1980. Dynamische Belastungsmessungen an den Klauen beim Rind. In: Organisation Committee (Hrsg.):

Proceedings of the 3rd International Symposium on Disorders of the Ruminant Digit, Wien, Österreich, 90-96.

Shearer, J.K., Stock, M.L., van Amstel, S.R., Coetzee, J.F., 2013. Assessment and management of pain associated with lameness in cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice* 29, 135-156.

Shearer, J.K., van Amstel, S.R., 2001. Functional and corrective claw trimming. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice* 17, 53-72.

Sigmund, B., 2009. Ermittlung von Hornschuh- und Lederhautabmessungen an den Klauen der Schultergliedmassen von Fleckrindern. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Sigmund, B., Sauter-Louis, C., Feist, M., Nuss, K., 2010. Abmessungen der Klauen der Schultergliedmassen von Mastbullen - Bedeutung für Klauenerkrankungen und Klauenpflege. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere / Nutztiere* 3, 147-155.

Singh, Y., Mohanty, T.K., 2012. Association of lameness with percent body weight distribution and shifting to individual limbs of static Karan Fries crossbred cows. *Indian Journal of Animal Sciences* 82, 962-970.

Smedegaard, H.H., 1964. Contusion of the sole in cattle. *The Veterinarian* 2, 119-139.

Smits, M.C.J., Frankena, K., Metz, J.H.M., Noordhuizen, J.R.T.M., 1992. Prevalence of digital disorders in zero-grazing dairy cows. *Livestock Production Science* 32, 231-244.

Sohrt, T., 1999. Ermittlung von Standardmassen für die Klauenpflege durch Untersuchungen über die Beziehung der anatomischen Innenstruktur zum Hornschuh an Klauen der Hintergliedmasse Deutsch Schwarzbunter Rinder mit Berücksichtigung von Reheveränderungen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.

Solano, L., Barkema, H.W., Pajor, E.A., Mason, S., LeBlanc, S.J., Heyerhoff, J.C., Nash, C.G., Haley, D.B., Vasseur, E., Pellerin, D., Rushen, J., Passillé, A.M. de, Orsel, K., 2015. Prevalence of lameness and associated risk factors in Canadian Holstein-Friesian cows housed in freestall barns. *Journal of Dairy Science* 98, 6978-6991.

Solano, L., Barkema, H.W., Mason, S., Pajor, E.A., LeBlanc, S.J., Orsel, K., 2016. Prevalence and distribution of foot lesions in dairy cattle in Alberta, Canada. *Journal of Dairy Science* 99, 6828-6841.

Spielmann, C., 1990. Messung der Druckverteilung unter Rinderklauen. Inaugural-Dissertation, Tierärztliche Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Sprecher, D.J., Hostetler, D.E., Kaneene, J.B., 1997. A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance. *Theriogenology* 47, 1179-1187.

Steiner, A., 2014. Kapitel 8: Behandlung häufiger Klauenerkrankungen. In: Lischer, C., Steiner, A., Geyer, H., Friedli, K., Ossent, P., Nuss, K., Klauenpflege. Edition Imz, Zollikofen, 99-108.

Surborg, H., 1982. Aspekte zur Behandlung schwerwiegender Klauenleiden des Rindes in der tierärztlichen Praxis. Deutsche Tierärztliche Wochenschrift 89, 333-335.

Telezhenko, E., Bergsten, C., 2005. Influence of floor type on the locomotion of dairy cows. Applied Animal Behaviour Science 93, 183-197.

Telezhenko, E., Bergsten, C., Magnusson, M., Nilsson, C., 2009. Effect of different flooring systems on claw conformation of dairy cows. Journal of Dairy Science 92, 2625-2633.

Telezhenko, E., Bergsten, C., Magnusson, M., Ventorp, M., Nilsson, C., 2008. Effect of different flooring systems on weight and pressure distribution on claws of dairy cows. Journal of Dairy Science 91, 1874-1884.

Telezhenko, E., Lidfors, L., Bergsten, C., 2007. Dairy cow preferences for soft or hard flooring when standing or walking. Journal of Dairy Science 90, 3716-3724.

Thomas, H.J., Miguel-Pacheco, G.G., Bollard, N.J., Archer, S.C., Bell, N.J., Mason, C., Maxwell, O.J., Remnant, J.G., Sleeman, P., Whay, H.R., Huxley, J.N., 2015. Evaluation of treatments for claw horn lesions in dairy cows in a randomized controlled trial. Journal of Dairy Science 98, 4477-4486.

Toussaint Raven, E., 1971. Belastingsmeting aan de andervoet van het rund. Tijdschrift voor Diergeneeskunde 96, 1237-1243.

Toussaint Raven, E., 1973. Determination of weight-bearing by the bovine foot. The Netherlands journal of veterinary science 5, 99-103.

Toussaint Raven, E., 1985. The Principles of Claw Trimming. Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice 1, 93-107.

Toussaint Raven, E., 1998. Klauenpflege beim Rind - Über die Entstehung und Vorbeuge von Sohlengeschwüren. Deutsche Übersetzung: Döpfer, D., Fakultät Veterinärmedizin, Universität Utrecht.

Tranter, W.P., Morris, R.S., 1992. Hoof growth and wear in pasture-fed dairy cattle. New Zealand Veterinary Journal 40, 89-96.

Tranter, W.P., Morris, R.S., Dohoo, I.R., Williamson, N.B., 1993. A case-control study of lameness in dairy cows. Preventive Veterinary Medicine 15, 191-203.

Tsuka, T., Murahata, Y., Azuma, K., Osaki, T., Ito, N., Okamoto, Y., Imagawa, T., 2014. Quantitative evaluation of the relationship between dorsal wall length, sole thickness, and rotation of the distal phalanx in the bovine claw using computed tomography. Journal of Dairy Science 97, 6271-6285.

van Amstel, S.R., Palin, F.L., Rorhbach, B.W., Shearer, J.K., 2003. Ultrasound measurement of sole horn thickness in trimmed claws of dairy cows. Journal of the American Veterinary Medicine Association 223, 492-494.

van der Tol, P.P.J., Metz, J.H.M., Noordhuizen-Stassen, E.N., Back, W., Braam, C.R., Weijs, W.A., 2002. The pressure distribution under the bovine claw during square standing on a flat substrate. Journal of Dairy Science 85, 1476-1481.

van der Tol, P.P.J., Metz, J.H.M., Noordhuizen-Stassen, E.N., Back, W., Braam, C.R., Weijs, W.A., 2003. The vertical ground reaction force and the pressure distribution on the claws of dairy cows while walking on a flat substrate. *Journal of Dairy Science* 86, 2875-2883.

van der Tol, P.P.J., van der Beek, S.S., Metz, J.H.M., Noordhuizen-Stassen, E.N., Back, W., Braam, C.R., Weijs, W.A., 2004. The effect of preventive trimming on weight bearing and force balance on the claws of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 87, 1732-1738.

van Heel, M.C.V., Barneveld, A., van Weeren, P.R., Back, W., 2004. Dynamic pressure measurements for the detailed study of hoof balance: the effect of trimming. *Equine Veterinary Journal* 36, 778-782.

Vereecke, E., D'Aout, K., Clercq, D. de, van Elsacker, L., Aerts, P., 2003. Dynamic plantar pressure distribution during terrestrial locomotion of bonobos (*Pan paniscus*). *American Journal of Physical Anthropology* 120, 373-383.

Vermunt, J.J., 1999. Regular claw trimming for the control of lameness - good or bad? *The Veterinary Journal* 157, 109-110.

Webb, N.G., Clark, M., 1981. Livestock foot-floor interactions measured by force and pressure plate. *Farm Building Progress* 66, 23-36.

Whay, H.R., Main, D.C., Green, L.E., Webster, A.J., 2003. Assessment of the welfare of dairy cattle using animal-based measurements: direct observations and investigation of farm records. *Veterinary Record* 153, 197-202.

Zeiner, H., Schobesberger, H., Skalicky, M., Stanek, C., 2007. Effect of different claw trimming methods on the pressure distribution under the bovine claw - an in vitro study. *Berliner und Münchner Tierärztliche Wochenschrift* 120, 165-172.

Zeiner, H., 2008. Pressure distribution under the solear surface of the bovine claw in comparison of different claw trimming systems. In: Organisation Committee (Hrsg.): *Proceedings of the 15th International Symposium and the 7th Conference on Lameness in Ruminants*, Kuopio, Finland, 200-202.

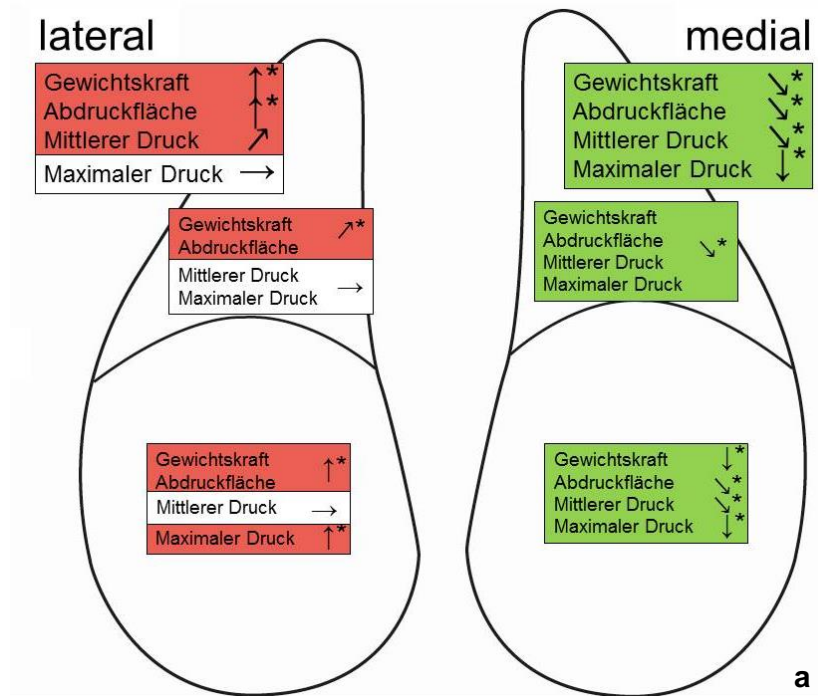
Zimmermann, I.B., Lüchinger, I., Nuss, K., 2018. Distribution of weight and pressure on the claw soles in young calves. In: WBC 2018 Organizing Committee (Hrsg.): *Abstract Book, World Buiatrics Congress 2018*, Sapporo, Japan, 82.

9. Anhang

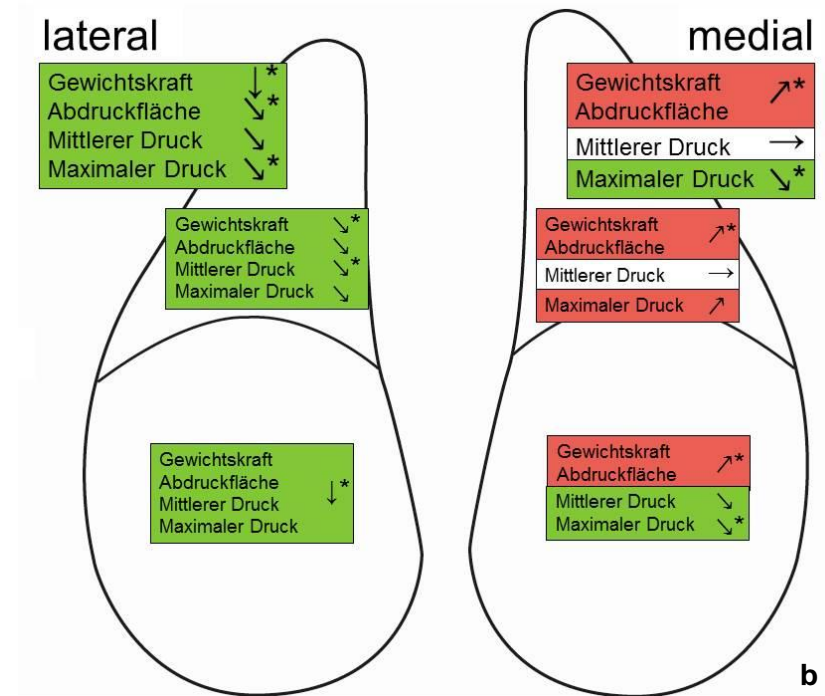
Tabelle 52: Übersicht zu den Versuchstieren.

| Tiernummer | Tiername | Rasse | Alter (in Monaten) | Körpergewicht (in Kilogramm) | Laktationszahl | Tage seit letzter Kalbung | Trächtigkeitsdauer (in Monaten) | Aktuelles Tagesgemelk im Heimetrieb (in Litern) | Tagesgemelk am Tierspital (in Litern) | Haltungsform | Monate seit letzter Klauenpflege |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|--|--|---------------------|---|
| 1 | Sennerin | Braunvieh | 38 | 675 | 1 | 251 | 6.5 | 14 | 12 | Anbindestall | 6 |
| 2 | Sibille | Rotfleck | 53 | 722 | 2 | 235 | 7 | 19 | 13 | Anbindestall | 6 |
| 3 | Parma | Braunvieh | 69 | 635 | 4 | 54 | 0 | 23 | 23 | Laufstall | 6 |
| 4 | Paola | Rotfleck | 54 | 660 | 2 | 254 | 6.75 | 10 | 11 | Anbindestall | 6 |
| 5 | Paula | Braunvieh | 36 | 590 | 1 | 269 | 6.25 | 10 | 8 | Anbindestall | 6 |
| 6 | Jsabell | Rotfleck | 54 | 643 | 3 | 219 | 5.5 | 15 | 15 | Anbindestall | 1.5 |
| 7 | Suleika | Rotfleck | 66 | 736 | 3 | 260 | 5.5 | 12 | 11 | Anbindestall | 1.5 |
| 8 | Naomi | Braunvieh | 38 | 615 | 1 | 306 | 6.75 | 10 | 10 | Anbindestall | 2.5 |
| 9 | Janka | Braunvieh | 73 | 700 | 4 | 196 | 4 | 16 | 8 | Laufstall | 9 |
| 10 | Ragusa | Braunvieh | 53 | 690 | 2 | 331 | 7 | 0 | 0 | Anbindestall | 2.5 |
| 11 | Geraldine | Rotfleck | 47 | 640 | 2 | 340 | 6.75 | 14 | 13 | Anbindestall | 2.5 |
| 12 | Palma | Braunvieh | 72 | 740 | 3 | 373 | 4.5 | 12 | 11 | Anbindestall | 4.5 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|----------|-----------|----|-----|---|-----|------|----|----|--------------|-----|
| 13 | Lacoste | Braunvieh | 64 | 543 | 3 | 141 | 1.75 | 18 | 16 | Anbindestall | 4.5 |
| 14 | Zora | Braunvieh | 62 | 630 | 3 | 135 | 0.75 | 23 | 21 | Anbindestall | 4 |
| 15 | Hirtin | Holstein | 41 | 705 | 1 | 241 | 6.75 | 18 | 14 | Laufstall | 1.5 |
| 16 | Rebecca | Holstein | 40 | 615 | 1 | 257 | 5.75 | 20 | 21 | Laufstall | 1.5 |
| 17 | Farida | Rotfleck | 65 | 674 | 3 | 210 | 4 | 20 | 19 | Anbindestall | 6 |
| 18 | Ines | Holstein | 34 | 660 | 1 | 295 | 7 | 20 | 15 | Laufstall | 3 |
| 19 | Rita | Braunvieh | 42 | 640 | 1 | 259 | 6 | 18 | 13 | Laufstall | 3 |
| 20 | Juliette | Holstein | 38 | 545 | 1 | 291 | 3.5 | 18 | 16 | Laufstall | 3.5 |
| 21 | Hailey | Holstein | 35 | 655 | 1 | 200 | 4.75 | 20 | 18 | Laufstall | 3.5 |
| 22 | Jara | Holstein | 31 | 545 | 1 | 178 | 4 | 18 | 17 | Laufstall | 5 |
| 23 | Brigitte | Braunvieh | 34 | 585 | 1 | 163 | 3 | 15 | 14 | Laufstall | 5 |
| 24 | Belinda | Braunvieh | 49 | 620 | 2 | 140 | 3 | 18 | 20 | Laufstall | 2.5 |
| 25 | Beatrice | Braunvieh | 30 | 520 | 1 | 151 | 3 | 13 | 15 | Laufstall | 2.5 |
| 26 | Jamaica | Holstein | 54 | 660 | 3 | 202 | 5 | 16 | 15 | Laufstall | 2.5 |
| 27 | Flurina | Rotfleck | 44 | 630 | 2 | 240 | 5 | 18 | 17 | Laufstall | 2.5 |
| 28 | Wufa | Braunvieh | 29 | 574 | 1 | 39 | 0 | 17 | 16 | Anbindestall | 6 |



Holzplättchen



Holzplättchen

Abbildung 58 (a-b): Überblick über Veränderungen der vier Haupt-Messparameter Gewichtskraft, Abdruckfläche der Klauen, mittlerer Druck und maximaler Druck an Aussen- und Innenklaue (grosse Boxen) inklusive Klauenzonen (kleine Boxen) einer Vordergliedmasse (hier beispielhaft anhand der linken Vordergliedmasse dargestellt) von der Ausgangssituation zur Messsituation Aussenklaue+H (a) respektive Innenklaue+H (b) hin. * = signifikante Veränderung, rot hinterlegt = Zunahme, grün hinterlegt = Abnahme, ↑/↓ = starke Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (prozentual im Median plus/minus > 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↗/↘ = leichte Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (prozentual im Median plus/minus < 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), → = über alle Tiere gesehen gleichbleibend (Abnahme oder Zunahme bei je 13 bis 15 von 28).

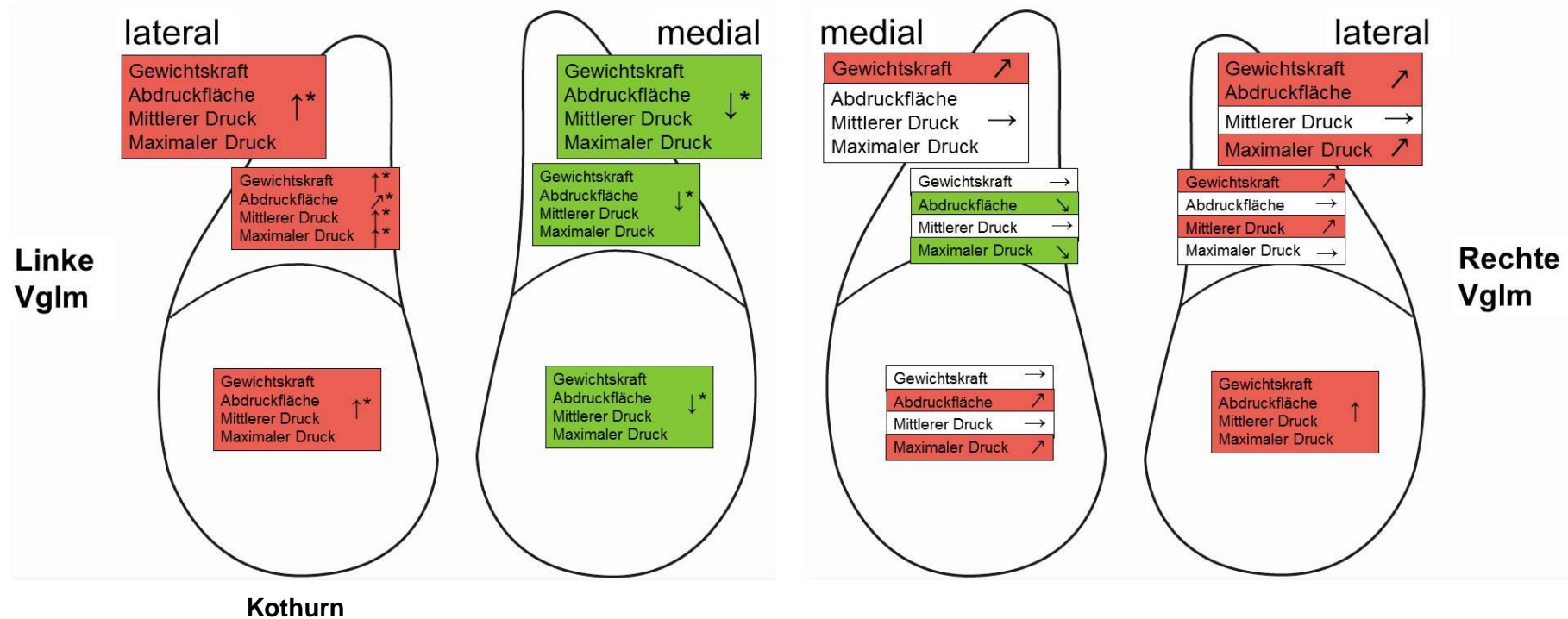


Abbildung 59: Überblick über Veränderungen der vier Haupt-Messparameter Gewichtskraft, Abdruckfläche der Klauen, mittlerer Druck und maximaler Druck an Aussen- und Innenklauen (grosse Boxen) inklusive Klauenzonen (kleine Boxen) der linken und rechten Vordergliedmasse (Vglim) von der Ausgangssituation zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin. * = signifikante Veränderung, rot hinterlegt = Zunahme, grün hinterlegt = Abnahme, ↑/↓ = starke Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus > 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↗/↘ = leichte Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus < 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), → = über alle Tiere gesehen gleichbleibend (Abnahme oder Zunahme bei je 13 bis 15 von 28).

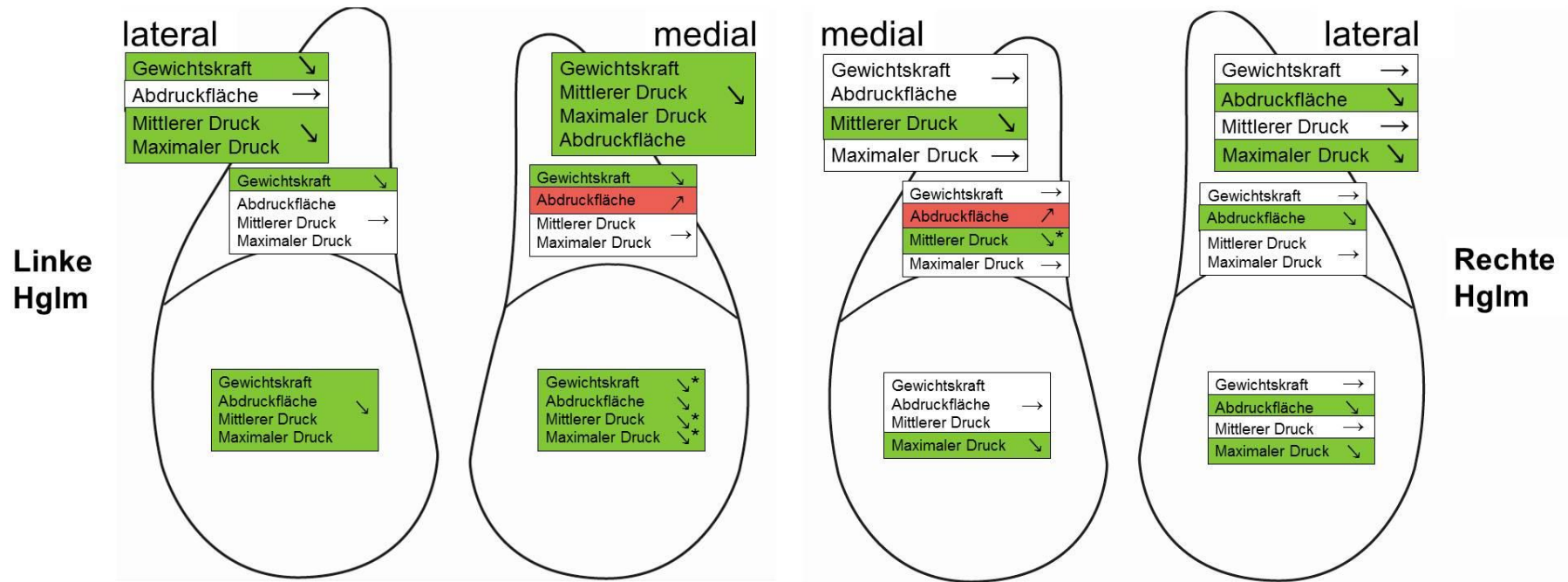


Abbildung 60: Überblick über Veränderungen der vier Haupt-Messparameter Gewichtskraft, Abdruckfläche der Klauen, mittlerer Druck und maximaler Druck an Aussen- und Innenklauen (grosse Boxen) inklusive Klauenzonen (kleine Boxen) der linken und rechten Hintergliedmasse (Hglm) von der Ausgangssituation zur Messsituation linke Vordergliedmasse+K hin. * = signifikante Veränderung, rot hinterlegt = Zunahme, grün hinterlegt = Abnahme, ↑/↓ = starke Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus > 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↓ = starke Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median minus > 30 %; Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↗/↘ = leichte Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus < 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), → = über alle Tiere gesehen gleichbleibend (Abnahme oder Zunahme bei je 13 bis 15 von 28).

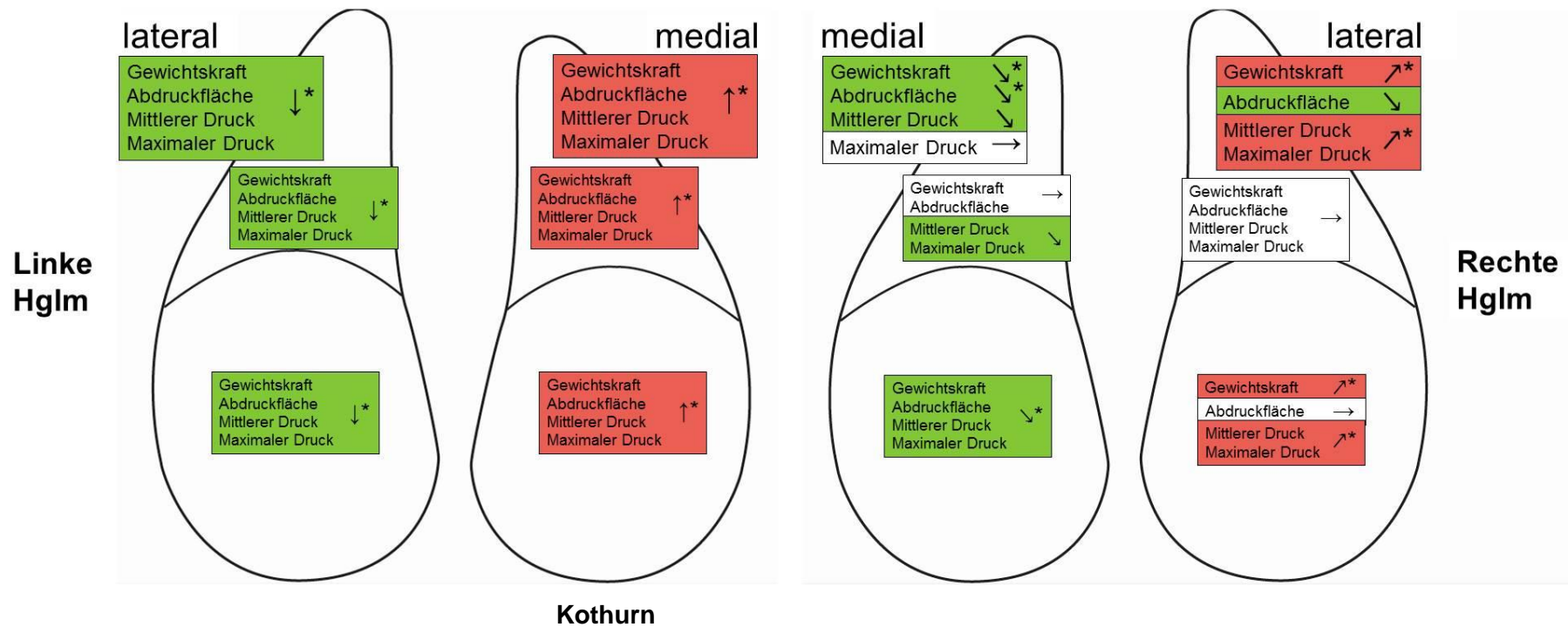


Abbildung 61: Überblick über Veränderungen der vier Haupt-Messparameter Gewichtskraft, Abdruckfläche der Klauen, mittlerer Druck und maximaler Druck an Aussen- und Innenklauen (grosse Boxen) inklusive Klauenzonen (kleine Boxen) der linken und rechten Hintergliedmasse (Hglm) von der Ausgangssituation zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K hin. * = signifikante Veränderung, rot hinterlegt = Zunahme, grün hinterlegt = Abnahme, ↑/↓ = starke Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus > 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↓ = starke Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median minus > 30 %; Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↗/↘ = leichte Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus < 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), → = über alle Tiere gesehen gleichbleibend (Abnahme oder Zunahme bei je 13 bis 15 von 28).

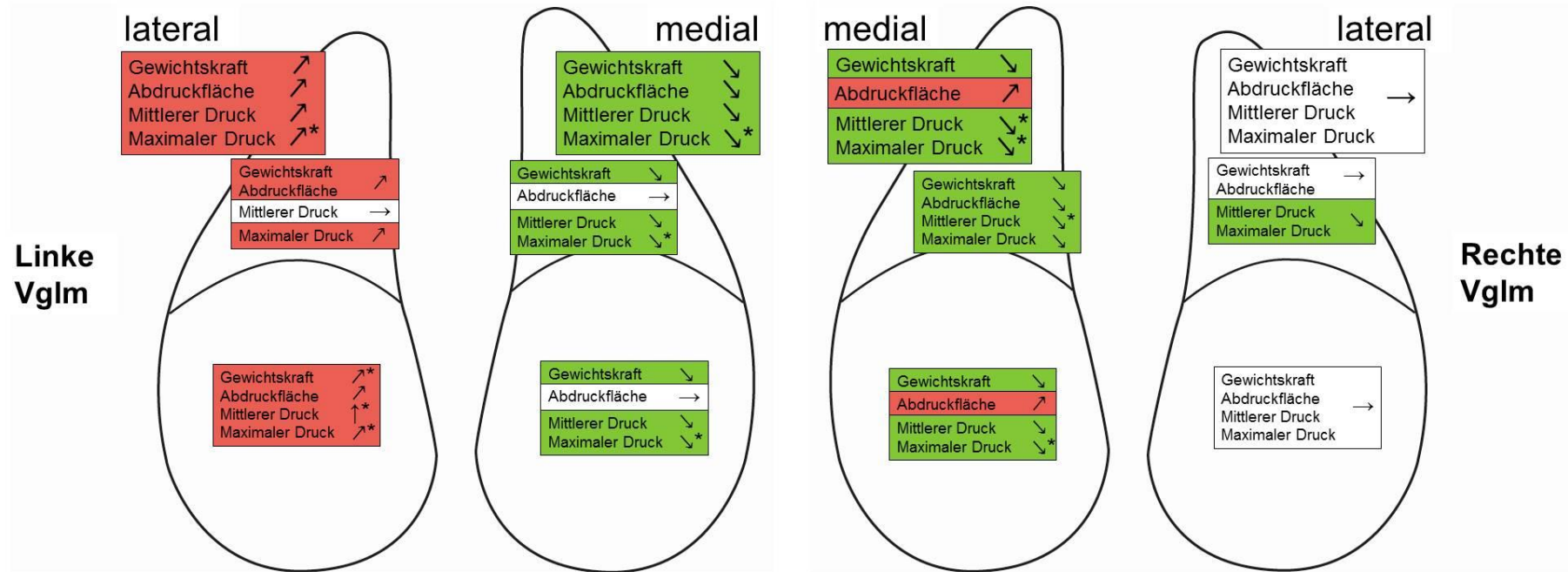


Abbildung 62: Überblick über Veränderungen der vier Haupt-Messparameter Gewichtskraft, Abdruckfläche der Klauen, mittlerer Druck und maximaler Druck an Aussen- und Innenklauen inklusive Klauenzonen der linken und rechten Vordergliedmasse (Vglm) von der Ausgangssituation zur Messsituation linke Hintergliedmasse+K. * = signifikante Veränderung, rot hinterlegt = Zunahme, grün hinterlegt = Abnahme, ↑/↓ = starke Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus > 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), ↗/↘ = leichte Zunahme/Abnahme bei Mehrheit der Tiere (im Median plus/minus < 30 %; Zunahme/Abnahme bei ≥ 16 von 28), → = über alle Tiere gesehen gleichbleibend (Abnahme oder Zunahme bei je 13 bis 15 von 28).

10. Danksagungen

Mein herzlicher Dank gilt folgenden Personen, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben:

Prof. Dr. Karl Nuss für das Überlassen dieses spannenden Themas, die Übernahme des Referats, das Konzipieren des Messstandes, die stete Beratung und grosse Unterstützung beim Erstellen dieser Arbeit und die Chance, während meiner vierjährigen klinischen Tätigkeit viel Wertvolles über die Klauenkrankheiten und die Nutztierchirurgie zu erlernen.

Prof. Dr. Michael Hässig für die Übernahme des Korreferats.

Dr. Judith Müller für die wertvolle, kollegiale Zusammenarbeit, die guten Diskussionen und die Unterstützung bei den Messungen mit den Kühen, bei der Auswertung und auch bei der täglichen Arbeit in der Klinik.

Jeanne Peter und **Pascal Glatzfelder** von der Vetcom für die illustratorische Bereicherung meiner schriftlichen Arbeit und meiner Vorträge dazu.

Eva Weidmann und **Luciano Schmid** für das Erstellen des Messstandes, welchen ich für meine Versuche verwenden durfte.

Karl Decker für das Herstellen der Holzplättchen für die Versuche.

Laurent Hoffmann von der Firma NUMO Systems AG für die Instruktionen zur Bedienung der Kraft- und Druckmessplatten und deren regelmässige Wartungen.

Dipl. El.-Ing. ETH Thomas Wiestner für das Erstellen der „Auswerter-Datei“, um die Messergebnisse aus der Messsoftware in eine übersichtliche Excel-Tabelle exportieren zu können, und für die Hilfe bei physikalischen oder mathematischen Fragen.

Dr. Nancy Cardona Galvado für die wertvollen Erklärungen zum Aufbau des Messstandes und die Tipps zur Durchführung der Messungen und **MSc Stat. Andres Cardona Gavaldon** für das Erstellen der Excel-Makro-Dateien zum Export der Resultate-Zeilen in eine Resultate-Masterdatei.

Prof. Dr. Michael Hässig und **Dipl. Math. ETH Barbara Urech Hässig** für ihre Hilfe bei mathematisch-statistischen Fragen.

Prof. Dr. Dr. Ueli Braun, Prof. Dr. Fredi Janett und **Dr. Carla Soliva†** für das Ermöglichen, Kühe vom „Stigenhof“ in Oberembrach ZH sowie vom „Strickhof“ in Lindau ZH (neu: „AgroVet-Strickhof“) für meine Versuche beizuziehen, und **Dr. Daniela Grob, Kaspar Luthiger** und **Sabine Rinderknecht** für die stets unkomplizierte Koordination des Einsatzes dieser Versuchskühe.

Zusätzlich den **Besitzern der Kühe** aus Mönchalt Dorf ZH, Lauerz SZ, Rothenthurm SZ, Wila ZH und Mühlrütli SG, welche mir ihre Tiere für meine Versuche anvertraut haben.

Den Studentinnen **Michelle Bressan, Sarah Meyer** und **Lina Stahel** für ihre engagierte Hilfe beim Durchführen meiner Messungen, sei es durch das geschickte Führen der Kühe oder durch ihre Unterstützung beim Auf- und Abbau des Messstandes.

Hans Oesch und **Oliver Neumann** für die Möglichkeit, die Messungen unter Dach vor dem Scheuneneingang oder im Stallgang durchzuführen.

Allen **Pflegerinnen und Pflegern der Nutztierklinik** für den Transport meiner Versuchskühe, für deren gute Betreuung am Tierspital und für die Hilfe beim Führen der Kühe, beim Aufbauen des Messstandes und beim Aufräumen und Putzen am Ende der Messtage.

All meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Nutztierklinik – insbesondere dem Chirurgie-Team (namentlich Dr. Nancy Cardona Gavaldon, Dr. David Devaux, Susanne Kretschmar, Dr. Judith Müller, Dr. Simon Nogler, Giachem Vital und David Winkelmeyer, Dr. Sandra Woodtli-Frei) – für die Begleitung und Unterstützung während meiner Klinikjahre, in denen ich viel von ihnen gelernt, viele spannende Fälle mit ihnen erlebt, viel mit ihnen gelacht und viele gute Gespräche mit ihnen geführt habe.

Meinen **Eltern**, meinem **Bruder**, meinen **Freundinnen und Freunden** für die bedingungslose Unterstützung in allen Lebensbelangen und die Motivation und Bekräftigung stets zur richtigen Zeit.

Und schliesslich geht mein grosser Dank an die Hauptdarstellerinnen dieser Arbeit: an die 30 **Kühe** für ihre Geduld und Lernfähigkeit.

11. Lebenslauf

| | |
|-------------------|---|
| Name | Isabelle Lüchinger |
| Geburtsdatum | 21. September 1990 |
| Geburtsort | Winterthur |
| Nationalität | Schweiz |
| Heimatort | Oberriet |
| 09/1997 – 07/2003 | Primarschule Wallrüti, Winterthur (Schweiz) |
| 09/2003 – 08/2009 | Kantonsschule Rychenberg, Winterthur (Schweiz) |
| 28/08/2009 | Matura, altsprachliches Profil (Latein und Englisch, bilinguale Maturität), Kantonsschule Rychenberg, Winterthur (Schweiz) |
| 09/2009 – 09/2014 | Studium der Veterinärmedizin (Schwerpunkt Nutztiere), Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich (Schweiz) |
| 10/2014 – 01/2015 | Staatsexamen, Vetsuisse Fakultät, Universität Zürich (Schweiz) |
| 29/01/2015 | Eidgenössischen Tierarzt-Diplom (vet. med.), Vetsuisse Fakultät, Universität Zürich (Schweiz) |
| 02/2015 – 06/2020 | Anfertigung der Dissertation unter der Leitung von Prof. Dr. med. vet. Karl Nuss am Departement für Nutztiere, Klinik für Wiederkäuer, Abteilung für Wiederkäuerchirurgie der Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich Departementsvorsteher: Prof. Dr. med. vet. Heiner Bollwein |

02/2015 – 02/2019

Assistentztierärztin, Doktorandin und Auszubildende für den FVH für Wiederkäuer in der Abteilung für Wiederkäuerchirurgie, Departement für Nutztiere, Vetsuisse-Fakultät, Universität Zürich (Schweiz)

Seit 03/2019

Assistentztierärztin in der Gemischtpraxis Tierarzt Siebnen AG, Siebnen (Schweiz)